

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Теплоенергетичний факультет

Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів

«На правах рукопису»  
УДК 681.5.015.8

«До захисту допущено»  
В.о.завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ / В.А.Волощук/  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності **151“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”**

на тему: Адаптивна система керування припливно-витяжною системою  
вентиляції з рециркуляцією

**Виконав:** студент II курсу, групи ТО-81мп

Адах Вадим Григорович

(прізвище ім’я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Науковий керівник** к.т.н., доцент Голінко І.М.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали )

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Рецензент**

\_\_\_\_\_ (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали )

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає  
запозичень з праць інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського”

Факультет Теплоенергетичний  
Кафедра Автоматизації теплоенергетичних процесів  
Рівень вищої освіти – другий(магістерський) за освітньо-професійною програмою  
Спеціальність 151“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) \_\_\_\_\_  
“ “ \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ /В.А.ВОЛОЩУК/  
(ініціали, прізвище)  
\_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

Адаха Вадима Григоровича  
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема дисертації Адаптивна система керування  
припливно-витяжною системою вентиляції з рециркуляцією

науковий керівник дисертації Голінко Ігор Михайлович, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «4» листопада 2019 р. № 3812-с

2. Термін подання студентом дисертації «10» грудня 2019 р.

3. Об’єкт дослідження система припливно-витяжної вентиляції з  
рециркуляцією

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-  
професійною програмою) методи керування припливно-витяжною системою вентиляції з рециркуляцією

5. Перелік завдань, які потрібно розробити  
Огляд системи вентиляції як об’єкту автоматизації. Математичне моделювання  
припливно-витяжної системи вентиляції. Розробка системи керування для  
припливно-витяжної вентиляції з рециркуляцією. Основні рішення з  
автоматизації системи вентиляції. Розроблення стартап-проекту.

6. Орієнтований перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Схема функціональна автоматизації; схема принципова електрична;

математична модель калорифера; математична модель приміщення;

структурна схема ПБСВ із рециркуляцією; апроксимація перехідних процесів;

розрахунок адаптивної системи регулювання; SCADA-система

7. Орієнтований перелік публікацій

1. «Аналіз системи керування для припливно-витяжної вентиляції із рециркуляцією» тези Дванадцята Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси».

2. «Математична модель припливно-витяжної системи вентиляції із рециркуляцією» тези XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів.

8. Дата видачі завдання " 04 " вересня 2018 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Видача завдання	04.09.2018	
2	Розділ 1. Огляд системи вентиляції як об'єкту автоматизації	27.12.2018	
3	Розділ 2. Математичне моделювання припливно-витяжної системи вентиляції	15.03.2019	
4	Розділ 3. Розробка системи керування для припливно-витяжної вентиляції з рециркуляцією	31.05.2019	
5	Аркуш 1. Схема автоматизації функціональна. Замовна специфікація.	15.06.2019	
6	Аркуш 2. Схема принципова електрична	28.06.2019	
7	Розділ 4. Основні рішення з автоматизації системи вентиляції	18.10.2019	
8	Стартап-проект	22.11.2019	
9	Підпис керівника магістерської дисертації		
10	Попередній захист магістерської дисертації	10.12.2019	
11	Захист	18.12.2019	

Студент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновку, переліку використаних джерел та креслень. Робота виконана в обсязі 106 сторінок, містить 78 рисунків, 28 таблиць, 2 креслення та 15 слайдів презентації.

**Актуальність теми.** Сучасні технологічні процеси диктують підвищені вимоги до температурного режиму виробництва, від чого в значній мірі залежить якість продукції та зменшення її собівартості. Промислові ПВСВ є реальним важелем прибутку для технологій: машинобудівної, легкої, харчової, аграрної, фармацевтичної, поліграфічної та інших галузей.

**Мета та задачі дослідження.** Метою магістерської дисертації є розробка АСК припливно-витяжної системи вентиляції з рециркуляцією, яка адаптується до зміни динамічних властивостей приміщення.

**Об'єктом дослідження** система припливно-витяжної вентиляції з рециркуляцією.

**Предмет дослідження.** Методи керування припливно-витяжною системою вентиляції з рециркуляцією. Комплексна математична модель припливно-витяжної системи вентиляції з рециркуляцією.

**Новизна та практичне застосування отриманих результатів.** В ході роботи було розроблено комплексну математичну модель припливно-витяжної системи вентиляції з рециркуляцією. Розроблено адаптивну систему керування системою вентиляції, яка є ефективною при різних динамічних властивостях приміщення.

**Апробації результатів дисертації.** Результати дисертації оприлюднені на 2 науково-практичних конференціях: Дванадцята Міжнародна науково-практична конференція Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2019), м. Київ, 21-22 травня 2019 року та XVII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів, 23-26 квітня 2019 року.

### Публікації

Адах В.Г., Голінко І.М. Аналіз системи керування для припливно-витяжної вентиляції із рециркуляцією: тези Дванадцятої Міжнародної науково-практичної конференції Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2019), м. Київ, 21-22 травня 2019р. Київ: НАУ, 2019. – С. 168–170.

Адах В.Г., Голінко І.М. Математична модель припливно-витяжної системи вентиляції із рециркуляцією: тези XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів, м. Київ, 23-26 квітня 2019 р. У 2 т. Київ: НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського", 2019. – Т. 2 – С. 14.

## **ABSTRACT**

Master's work is consists of introduction, 5 sections, conclusion, references and drawings. The work is 106 pages in size, contains 78 drawings, 28 tables, 2 sheets of graphical material and 15 slides.

**Actuality of theme.** Modern technological processes dictate the increased requirements to the temperature regime of production, which largely depends on the quality of products and reducing its cost. Industrial SESV is a real lever of profit for technologies: engineering, light, food, agricultural, pharmaceutical, printing and other industries.

**The aims and objectives of the study.** The purpose of the master's thesis is the development of ACS tidal exhaust ventilation system with recirculation, which adapts to changing the dynamic properties of the room.

**The object of research** is a system of supply and exhaust ventilation with recirculation.

**The subject of research.** Methods of control of the intake-exhaust ventilation system with recirculation. Comprehensive mathematical model of the exhaust ventilation system with recirculation

**Innovative novelty and the practical significance of the results.** In the course of the work, a complex mathematical model of the exhaust ventilation system with recirculation was developed. An adaptive ventilation control system has been developed that is effective for various dynamic room properties.

**Thesis Testing Results.** The results of the dissertation were published at 2 scientific and practical conferences: Twelfth International Scientific and Practical Conference Integrated Intelligent Robotics Complexes (IIRTK-2019), Kyiv, May 21, 2019 and XVII International Scientific and Practical Conference of Young Students, 26-26 2019.

### **Publications**

Adakh V., Golinko I. Analysis of the control system for intake exhaust ventilation with recirculation: abstracts of the Twelfth International Scientific Conference on Integrated Intelligent Robotics (IIRTK-2019), Kyiv, 21 May 22, 2019. Kiev: NAU, 2019. - P. 168–170.

Adakh V., Golinko I. Mathematical model of the exhaust ventilation system with recirculation: abstracts of the XVII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students, Kyiv, April 23-26, 2019 In 2 volumes Kiev: NTUU "KPI. I. Sikorsky", 2019. - Vol. 2 - P. 14.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	8
ВСТУП.....	9
1    ОГЛЯД СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЯК ОБ'ЄКТУ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	11
1.1    Огляд технології систем вентиляції.....	11
1.2    Огляд обладнання для систем вентиляції .....	16
1.3    Огляд методів керування та функції системи автоматизації .....	21
1.4    Постановка задачі дослідження .....	31
2    МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИПЛИВНО-ВИТЯЖНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ .....	33
2.1    Розробка математичної моделі теплообмінного апарату .....	33
2.2    Структура математичної моделі теплообмінного апарату .....	36
2.3    Моделювання перехідних процесів для калорифера .....	37
2.4    Моделювання перехідних процесів для охолоджувача.....	41
2.5    Розробка математичної моделі приміщення .....	44
2.6    Моделювання перехідних процесів для приміщення .....	47
2.7    Математична модель припливно-витяжної системи вентиляції із рециркуляцією .....	49
2.8    Апроксимація перехідних характеристик .....	53
3    РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ПРИПЛИВНО-ВИТЯЖНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ .....	58
3.1    Структурна схема АСР.....	58
3.2    Вибір методу налагодження АСР .....	59
3.3    Розрахунок АСР для зимового режиму роботи системи .....	60
3.4    Розрахунок АСР для літнього режиму роботи системи .....	64
3.5    Інтерполяція розрахункових даних для адаптивного регулятора .....	67

	7
4 ОСНОВНІ РІШЕННЯ З АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ....	71
4.1 Технічні рішення з контролю та регулювання системи вентиляції .....	71
4.2 Реалізація програмного керування системою вентиляції на контролері Schneider Electric Modicon M172 .....	72
4.3 Диспетчеризація системи керування припливно-витяжною системою вентиляції .....	85
5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	91
5.1 Опис ідеї проекту.....	91
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту .....	92
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	92
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	99
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	101
ВИСНОВКИ.....	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	106

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ПВСВ – припливно-витяжна система вентиляції;

ОК – об’єкт керування;

АСК – автоматична система керування;

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор;

РО – регулюючий орган;

ВМ – виконавчий механізм;

ПЛК – програмно-логічний контролер;

ПЗ – програмне забезпечення;

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition;



## ВСТУП

Вентиляція – процес видалення повітря з приміщення і заміна його свіжим, обробленим повітрям. Вентиляція – необхідна складова здорового мікроклімату в оселі, адже без необхідного об'єму свіжого повітря ми зіштовхнемось із погіршенням працездатності, самопочуття та здоров'я. Також вентиляція створює умови повітряного середовища, що відповідають вимогам технологічного процесу, збереження устаткування і будівельних конструкцій будівлі, зберігання матеріалів, продуктів, книг, картин і т. д.

Будь-який промисловий, виробничий або інший комерційний об'єкт потребує сучасної промислової припливно-витяжної вентиляції і кондиціонування. І на кожному етапі будівництва має приділятися підвищена увага економічності, ефективності і працездатності таких систем. Якщо побутові системи вентиляції повинні бути економічними і тихими, то для промислових систем в пріоритет ставиться надійність. Буде неприємно зупиняти робочий процес через несправність будь-якого елементу системи вентиляції промислових цехів. Тому в наш час, при рості цін на енергоресурси, актуальність систем мікроклімату приміщень є дуже важливою.

Вимоги до систем вентиляції встановлюються державними санітарно-гігієнічними нормами, будівельними нормами, а також вимогами технологічних процесів. Залежно від типу та призначення приміщення, ці вимоги регламентують продуктивність вентиляції, гранично допустиму концентрацію шкідливих речовин в приміщеннях, температуру та вологість повітря, рівень шуму, що генерується чи передається вентиляційною системою, швидкість потоку повітря у повітропроводах та інші параметри.

Ефективна та економічна робота вентиляційної системи досягається в першу чергу за рахунок сучасної системи автоматики та управління системою. Будь-яка система вентиляції є багатомірним об'єктом з великою кількістю зв'язків. Лише з сучасною АСУ працюючою за оптимальними алгоритмами можна задовольнити умовам безпеки, ефективності, надійності та економічності

при роботі такої системи. Також, сучасні системи автоматики мають зручний інтерфейс керування.

В даній магістерській дисертації представлена адаптивна система припливно-витяжної вентиляції із рециркуляцією приміщення з площею 900 м<sup>2</sup>.

# 1 ОГЛЯД СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЯК ОБ'ЄКТУ АВТОМАТИЗАЦІЇ

## 1.1 Огляд технології систем вентиляції

Системи вентиляції поділяють природну та штучну (механічну).

Природна вентиляція та кондиціонування приміщень зумовлюється різницею температур зовнішнього та внутрішнього повітря та силою вітру. Вітровий напір спричиняє з однієї сторони будинку збільшений тиск і загання повітря в приміщення, а з підвітряної сторони, за рахунок розрядження – витягує повітря з приміщень. Повітрообмін залежить від матеріалу стін будинку. Дерево та цегла, добре пропускають повітря. Бетонні стіни, фарбування масляною фарбою, цементна штукатурка значно зменшують повітропроникність.

З метою посилення природної вентиляції та кондиціонування в стінах житлових будинків прокладають витяжні вентиляційні канали, що мають отвори на кухні, ванній кімнаті та туалеті. Ці канали закінчуються на даху спеціальними насадками – дефлекторами, котрі посилюють витягування повітря за рахунок сили вітру. В сучасних житлових будинках, системи з каналною витяжною вентиляцією не завжди забезпечують видалення «відпрацьованого» повітря з квартир. Крім того часто виникає явище «опрокидування тяги». В цьому випадку, через вентиляційні канали в приміщення потрапляють побічні запахи та пил, що супроводить до розповсюдження забруднення та інфекцій із однієї квартири в інші.

В механічних системах вентиляції використовується обладнання та прилади (вентилятори, електродвигуни, повітронагрівачі, фільтри, автоматика, тощо), що дозволяє переміщувати повітря на значні відстані і в потрібних напрямках. Витрати електроенергії на роботу такої системи можуть бути досить великими. Такі системи можуть подавати або витягувати повітря із локальних зон приміщення в потрібній кількості, незалежно від умов зовнішнього середовища. При необхідності, повітря обробляють необхідним чином (фільтрують, нагрівають, охолоджують, звожують, іонізують, тощо), що майже неможливо в системах природної вентиляції.

Слід зауважити, що на практиці часто передбачають так названу «змішану вентиляцію». Тобто одночасно і природну і штучну (механічну) системи. В кожному окремому проекті визначається який тип вентиляції буде найкращим в санітарно-гігієнічному відношенні, а також технічно та економічно раціональним.

Механічна вентиляція буває припливною, витяжною та припливно-витяжною. В свою чергу припливно-витяжні системи поділяють на системи з окремим припливним та витяжним каналами, з рециркуляцією повітря та з рекуперацією повітря.

В системах вентиляції, метою автоматизації управління є досягнення стабільності певного параметру. Так як витрата повітря як правило не змінюється з часом, то регульованими параметрами можуть бути лише теплофізичні властивості повітря – температура або вологість. Розглянемо методи керування системами вентиляцій на прикладах:

#### 1. Припливна система вентиляції

Припливні системи вентиляції слугують для подачі у приміщення чистого повітря. Повітря що подається в приміщення, в необхідних випадках фільтрується, нагрівається або охолоджується, зволожується та ін.

Припливна система вентиляції зображена на рис. 1.1.

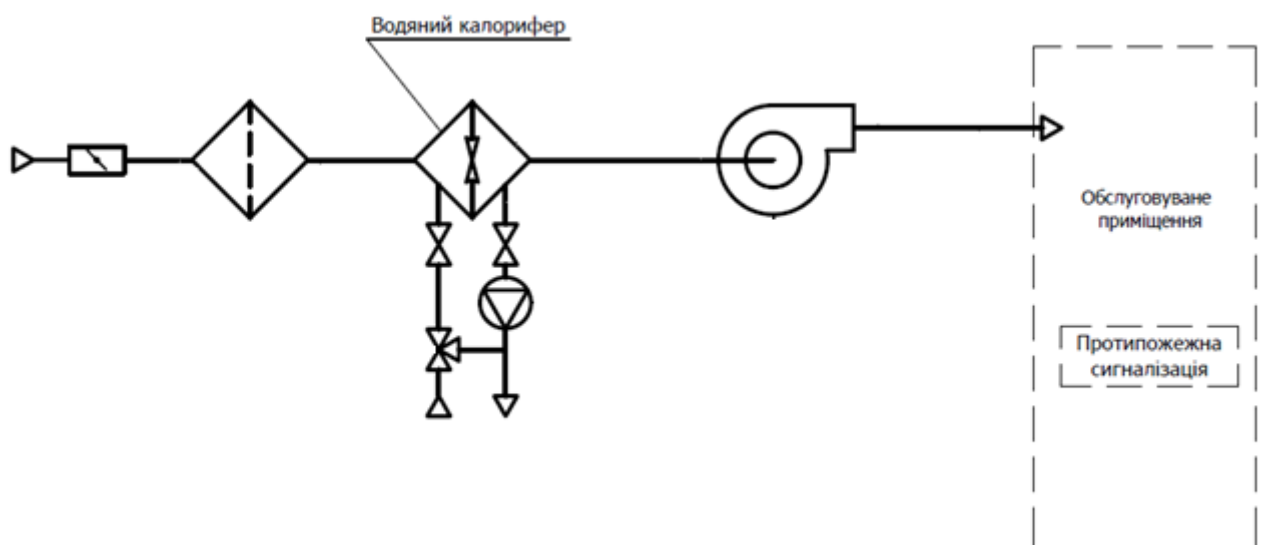


Рис. 1.1 Припливна система вентиляції

Основними елементами системи є: водяний калорифер, вентилятор, повітряна заслінка та фільтр. В даній системі регулювання температури в приміщенні відбувається за допомогою водяного калориферу та вентилятора за датчиком температури припливного повітря. Перехід між режимами зима-літо відбувається в ручному або автоматичному режимі в залежності від температури зовнішнього повітря. В більшості сучасних установок температура переходу зима-літо вважається  $10^{\circ}\text{C}$ . Датчик температури зворотної води водяного калорифера слугує для підтримання температури зворотної води за допомогою роботи змішувального вузла в черговому режимі. Забруднення фільтра припливного каналу визначається за допомогою реле перепаду тиску.

## 2. Витяжна система вентиляції

Витяжна вентиляція видаляє з приміщення (цеху, корпусу) або його локальної зони забруднене відпрацьоване повітря.

Витяжна система вентиляції зображена на рис. 1.2.

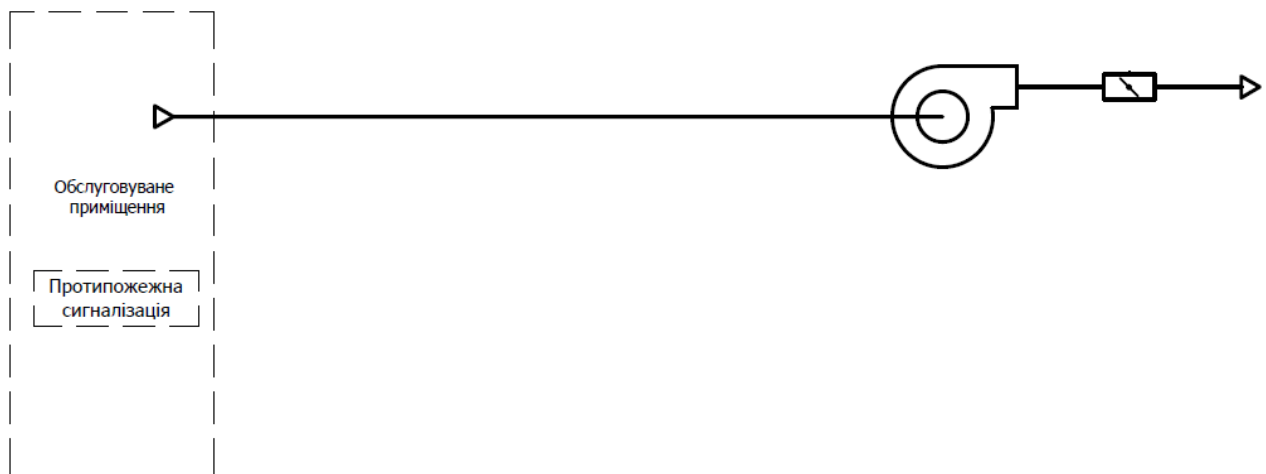


Рис. 1.2 Витяжна система вентиляції

Основними елементами системи є: вентилятор та заслінка. Регулювання відбувається за допомогою витяжного вентилятору.

## 3. Припливно витяжна система вентиляції

Припливно-витяжна система вентиляції здатна забезпечити як подачу, так і забір повітря з приміщення, при цьому, залежно від кількості припливного та витяжного повітря у приміщенні, може виникати як надлишковий тиск, так і розрідження. Система зображена на рис. 1.3.

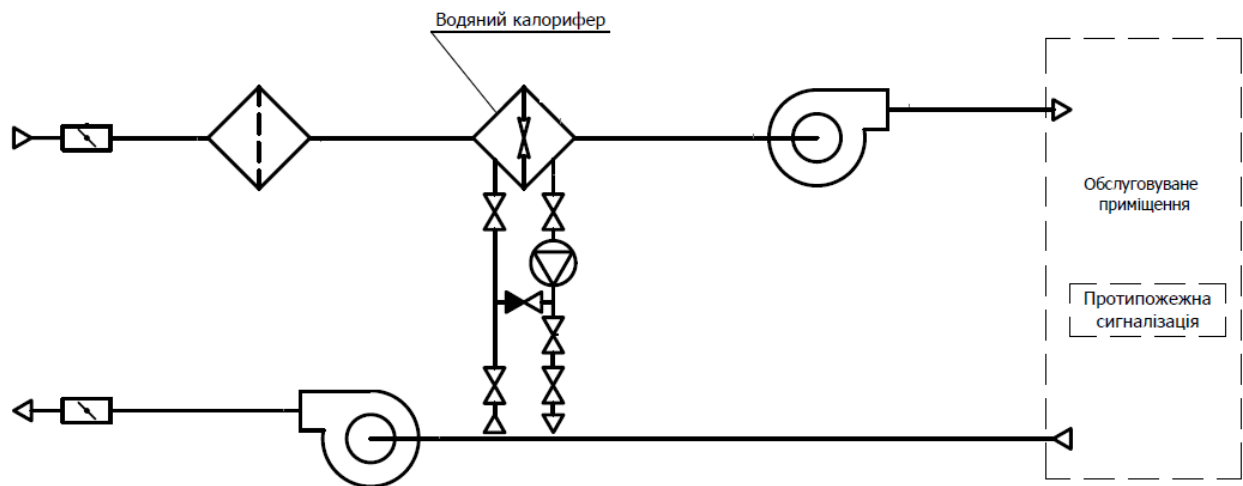


Рис. 1.3 Припливно-витяжна система вентиляції

Основними елементами системи є: водяний калорифер, вентилятори, заслінки та фільтр. Регулювання температури повітря в приміщенні аналогічне припливній вентиляції. Витяжний вентилятор в даній системі керується одним аналоговим входом з припливним, але вентилятори мають окремі пуски.

#### 4. Припливно-витяжна система вентиляції із рециркуляцією

Припливно-витяжна система вентиляції із рециркуляцією зображена на рис. 1.4.

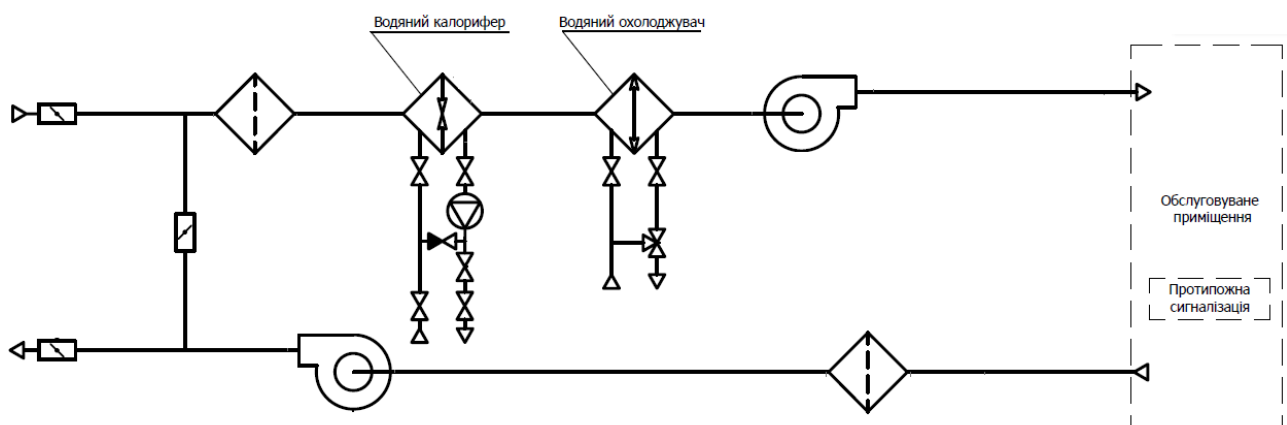


Рис. 1.4 Припливно-витяжна система вентиляції із рециркуляцією

Основними елементами системи є: водяний калорифер, водяний охолоджувач, вентилятори, повітряні заслінки та фільтри.

Рециркуляція використовується для підтримки температури в припливному каналі шляхом підмішування витяжного (теплого/холодного)

повітря до припливного повітря (холодного/теплого). Недоліком такої системи є збільшення концентрації CO<sub>2</sub> для житлових приміщень та збільшення вологості. Тому системи вентиляції з рециркуляцією частіше за все використовуються для вентиляції промислових будівель.

#### 5. Припливно-витяжна система вентиляції із рекуператором

Рекуперація тепла – процес передачі теплоти відпрацьованого повітря для припливного (зовнішнього). Припливно-витяжна система вентиляції із рекуператором зображена на рис. 1.5.

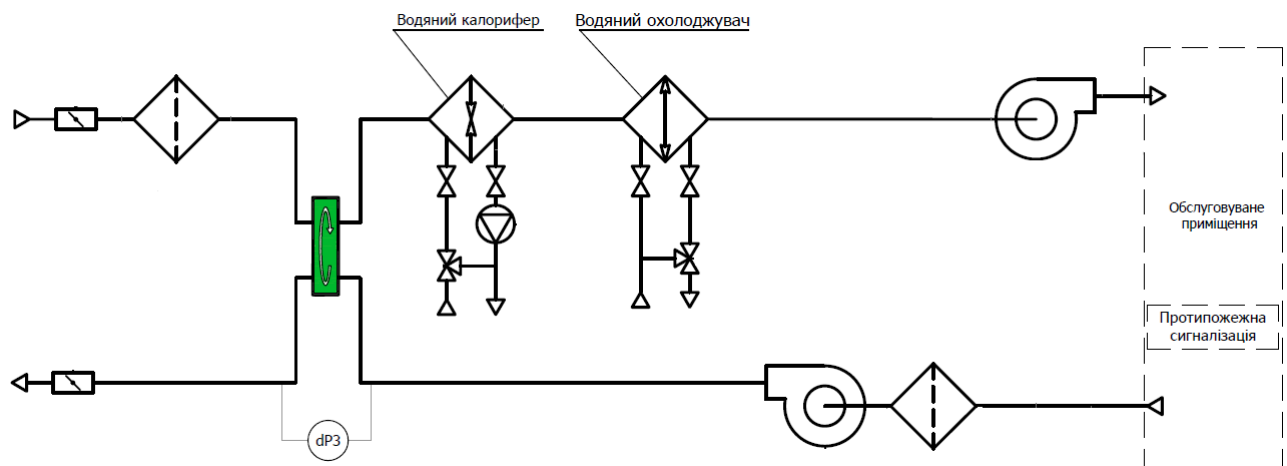


Рис. 1.5 Припливно-витяжна система вентиляції із рекуператором

Основними елементами системи є: водяний калорифер, водяний охолоджувач, вентилятори, повітряні заслінки, роторний рекуператор та фільтри.

Припливне повітря отримує (віддає) теплову енергію у витяжний канал через рекуператор, що обертається за допомогою роторного двигуна, яким керує частотний перетворювач.

В загальному випадку, в приміщеннях передбачають як припливні так і витяжні системи. Їх потужність повинна бути збалансована з врахуванням можливостей подачі або витягування повітря з суміжних приміщень. Також, може бути передбачена тільки припливна або тільки витяжна вентиляція. В цьому випадку, повітря потрапляє в приміщення із зовнішнього середовища, або перетікає із суміжних приміщень через передбачені для цього отвори.

Будь-який тип вентиляційної системи може бути локальним або застосовуватись для всього приміщення (загально-обмінна вентиляція).

Також такі системи вентиляції як з рекуператором або рециркуляцією дозволяють досягнути до 95% ефективності. Показником інтенсивності повітрообміну в системах вентиляції є кратність повітрообміну: відношення об'єму припливного або витяжного повітря до об'єму приміщення. Нормовані кратності повітрообміну зазначені у державних будівельних нормах (ДБН) і досягнути таких показників допоможе винятково механічна вентиляція.

## **1.2 Огляд обладнання для систем вентиляції**

До обладнання систем вентиляції відносять різноманітне устаткування та установки, що приймають участь у процесі підготовки, обробки або переміщення повітряних мас. Таким устаткуванням є повітропроводи, заслінки, нагнітачі повітря (вентилятори), підігрівачі, охолоджувачі, зволожувачі та осушувачі повітря.

Розглянемо основне обладнання систем вентиляції:

1. Водяний калорифер представляє собою стальний трубчастий теплообмінник, де проходить гаряча вода з системи опалення будівлі.

Функції водяного калориферу:

- автоматичне підтримання заданої температури зворотної води в черговому режимі;
- автоматичне підтримання дозволеної тепломережею границі температури зворотної води;
- автоматичний контроль і запобігання небезпеки обмерзання калорифера шляхом аналізу температури зворотної води в каналі. Також контролюється сигнал капілярного термостату;
- можливість відключення контролю замерзання по температурі каналу в черговому режимі і в перший час після включення вентилятору (функція продувки каналу);
- керування циркуляційним насосом.



При переході з режиму «Викл» в режим «Робота», починається прогрів калорифера до температури зворотної води, визначеною графіком прогріву або статичною уставкою (режим «Прогрів»). Після прогріву і запуску починається регулювання температури повітря в припливному каналі по ПІ-закону регулювання. Циркуляційний насос працює завжди, коли працює водяний калорифер.

2. Електрокалорифери застосовують для нагріву повітря в системах опалення та вентиляції повітря в різних приміщеннях. В системах вентиляції електрокалорифери призначені для підігріву припливного повітря.

Корпус і комутаційна коробка виготовлені з оцинкованого сталевих листа, нагрівальні елементи - з нержавіючої сталі. Для герметичного з'єднання з повітроводами нагрівачі забезпечені гумовими ущільнювачами. Контакти термостатів виводяться на окремі клеми для зовнішнього підключення.

Агрегати з електричним нагрівачем стандартно комплектуються захисними термодокладами. Також є захист електричного калорифера від короткого замикання, здійснювана плавкими запобіжниками.

Принцип дії системи захисту електрокалорифера наступний: при виникненні загрози перегріву відбувається відключенням електрокалорифера і припливного вентилятора, з попередніми зніманням тепла.

Для кожного типорозміру існує кілька варіантів потужності. Більшій потужності можна досягти за допомогою установки нагрівачів послідовно один за одним. Всі трифазні нагрівачі з'єднуються між собою за схемою «зірка».

3. Водяні охолоджувачі призначені для охолодження припливного повітря в припливних або припливно-витяжних установках. Корпус виконаний з оцинкованої листової сталі, трубні колектори виготовлені з мідних труб, поверхня теплообміну – з алюмінієвих пластин. Охолоджувач обладнаний каплеуловлювачем і дренажним піддоном для збору і відводу конденсату.

4. Фреоновий охолоджувач (повітроохолоджувачі з прямим випарним охолодженням) призначені для охолодження припливного повітря в припливних системах вентиляції або припливно-витяжних установках. Корпус охолоджувача виконаний з оцинкованої листової сталі, трубні колектори виготовлені з мідних

труб, поверхня теплообміну - з алюмінієвих пластин. Охолоджувачі призначені для експлуатації з холодоагентами R123, R134a, R152a, R404a, R407c, R410A, R507, R12, R22. Охолоджувач обладнаний каплеуловлювачем і дренажним піддоном для збору і відводу конденсату.

5. Вентилятори забезпечують подачу свіжого повітря з вулиці в приміщення і викид відпрацьованого повітря за межі приміщення. В склад установки входить пристрій плавного керування обертами вентилятора – частотний перетворювач. Завдяки йому є можливість плавної зупинки і розгону вентиляторів.

Контролер керує частотним перетворювачем двома виходами: дискретним та аналоговим. Дискретних вихід контролера за допомогою контактора подає живлення на ПЧ в звичайному стані і відключає ПЧ від мережі при аварії вентилятора. Дану функцію можна не використовувати при наявності внутрішніх захисних ланцюгів в ПЧ. Аналоговим виходом контролер задає частоту обертання вентилятора. При цьому в ПЧ повинна бути задіяна функція «автоматичної зупинки» (при завданні частоти менше 5 Гц ПЧ входить в стан «зупинки»).

6. Роторний рекуператор являє собою короткий циліндр, начинений розташованими вздовж і щільно упакованими шарами гофрованої сталі. Такий ротор розташовується в осьовому напрямку припливно-витяжної установки. Обертаючись, барабан регенератора спочатку пропускає через себе тепле витяжне, потім холодне припливне повітря. Пластини по черзі нагріваються й охолоджуються, віддаючи тепло вхідному холодному повітрю, безперервно підігріваячи його. Такий тип теплоутилізатора є найбільш ефективним, то в той же час доволі громіздким. Тому такі установки застосовують найчастіше на великих об'єктах, де є можливість розташувати припливно-витяжну систему в просторій вентиляційній камері.

Для управління роторним рекуператором реалізовані наступні функції:

- Визначення доцільності включення рекуператора;
- Рекуперація тепла і холоду;
- Захист від обмерзання робочого колеса;

- Плавна зміна числа обертів приводу рекуператора для досягнення найбільшого ККД його роботи;
- Періодичний поворот робочого колеса вимкненого з роботи рекуператора.

Рекуператор включається в роботу, якщо виконані всі наступні умови:

- В даний час року дозволена робота рекуператора;
- Температура зовнішнього повітря нижче уставки, і температура в приміщенні вище температури зовнішнього повітря або температура зовнішнього повітря вище уставки, і температура в приміщенні нижче температури зовнішнього повітря;
- Різниця температур зовнішнього повітря і повітря в приміщенні більше  $2^{\circ}\text{C}$ ).

Якщо ці умови виконані, рекуператор включається в роботу. Продуктивність регулюється відповідно до завдання від регулятора.

Рекуператор вимикається з роботи, якщо виконано одну з таких умов:

- Змінилася пора року, і робота рекуператора в цю пору року заборонена;
- Температура зовнішнього повітря вище уставки, і температура в приміщенні вище температури зовнішнього повітря або температура зовнішнього повітря нижче уставки, і температура в приміщенні нижче температури зовнішнього повітря;
- Різниця температур зовнішнього повітря і повітря в приміщенні менше  $2^{\circ}\text{C}$ ;
- Рекуператор аварійно зупинений через занадто великого падіння тиску на ньому;
- Рекуператор аварійно зупинений через падіння температури в витяжному каналі.

Крім регулятора температури припливного повітря на рекуператор також впливає і температура витяжки. При зниженні температури повітря у витяжному каналі нижче заданої в уставки «Твит, норма» виникає небезпека обмерзання

робочого колеса, тому управління перехоплюється обмежувальним регулятором, який буде знижувати продуктивність рекуператора до того моменту, поки температура витяжки не стабілізується на заданій відмітці.

Якщо робота рекуператора не потрібна або неможлива, то контролер буде здійснювати щоденний оберт робочого колеса для його очищення. У разі аварійного стану рекуператора оберт не проводиться.

Роторний рекуператор може ініціювати дві аварії:

- обмерзання робочого колеса - спрацьовує при падінні температури витяжки нижче  $0^{\circ}\text{C}$ . Рекуператор зупиняється, його робота поновлюється, коли температура витяжки стане вище аварійної. У журнал заноситься запис «обмерзнув. рекуператора»
- Захист двигуна - при цьому контроль електричних параметрів електродвигуна здійснюється вбудованими функціями самого частотного перетворювача. У журнал заноситься запис «Аварія рекуператора», рекуператор відключається.

Обидві аварії зупиняють лише рекуператор, не зачіпаючи роботи інших частин вентустановки, вентилятори та інші виконавчі пристрої продовжують працювати в штатному режимі.

7. Рециркуляція (камера змішування) дозволяє підмішувати витяжної повітря до припливного в разі, якщо сумарної потужності нагрівальних приладів не вистачає для досягнення уставки. Для управління заслінкою реалізації реалізовані наступні функції:

- Плавне регулювання підмішування витяжного повітря;
- Обмеження максимального підмішування повітря.

Коли вентиляційна установка зупинена, заслінка рециркуляції повністю відкрита. При відкритті заслінки припливного повітря заслінка рециркуляції закривається. Мінімальний і максимальний кут відкриття заслінки рециркуляції визначається санітарно-гігієнічними нормами. Системи з рециркуляцією застосовуються тільки якщо повітря, що надходить з приміщення не містить шкідливих речовин та токсичних домішок.

8. Повітряні клапани запобігають потраплянню в приміщення зовнішнього повітря при вимкненій системі вентиляції. Повітряні клапани особливо необхідні взимку, оскільки без них в приміщення буде потрапляти холодне повітря і сніг. Клапани працюють з електроприводом, що дозволяє автоматично відкривати їх при ввімкненні вентиляторів та закривати при вимкненні.

9. Повітряні фільтри застосовуються для очищення припливного, а в ряді випадків і витяжного повітря в системах вентиляції і кондиціонування. Служать для захисту повітропроводів, теплообмінників, вентиляторів, приладів автоматики та іншого вентиляційного обладнання від запилення, комах та інших не бажаних домішок. Зводять до мінімуму забруднення стін і стель близько повітророзподільних пристроїв. Фільтри грубої очистки можуть застосовуватися в якості першого ступеня очищення перед більш ефективними фільтрами. Фільтри необхідно періодично очищати від бруду та пилу, зазвичай не рідше одного разу на місяць.

### **1.3 Огляд методів керування та функції системи автоматизації**

Для термообробки припливного повітря у системах вентиляції використовують калорифер, або калорифер та охолоджувач. В системах вентиляції калорифери можуть бути водяними, або електричними, а охолоджувачі водяними, або фреоновими. Для невеликих вентиляційних установок вигідніше використовувати електричні калорифери, оскільки установка такої системи вимагає менших затрат [3]. Для об'єктів понад 700м<sup>2</sup> використовують водяний калорифер оскільки витрати на електроенергію виявляться дуже великими. Структурну схему водяного калорифера інтегрованого в систему вентиляції зображено на рис 1.6.

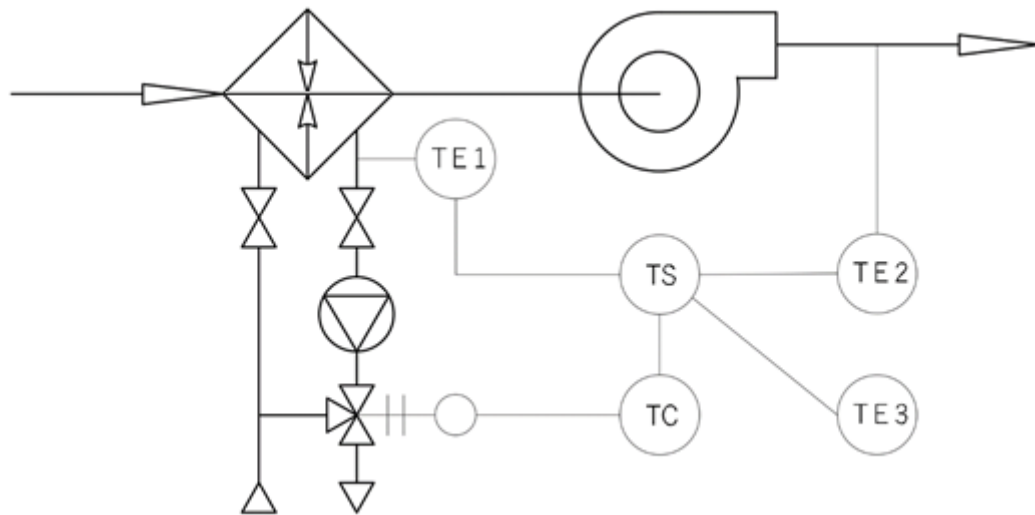


Рис. 1.6 САР температури припливного повітря з водяним калорифером

Для регулювання температури припливного повітря за допомогою водяного калорифера, вимірюється температура повітря після нагнітаючого вентилятора (TE2), сигнал від датчика подається на регулятор температури TC, що керує приводом триходового клапану. У труби водяного калорифера подається гаряча вода, що передає тепло повітря, яке проходить через калорифер. При зміні положення триходового клапану вода, що циркулює в системі калорифера частково скидається в мережу, а на її місце приходить нова гаряча вода. Такий спосіб регулювання дозволяє підігрівати припливне повітря до необхідної температури. Для захисту калориферу від замерзання контролюється температура зворотного теплоносія калорифера за допомогою датчика температури TE1. Перемикач режиму роботи калорифера (TS) потрібний для випадку коли калорифер не використовується, а температура навколишнього середовища, що вимірюється датчиком TE3 достатньо низька для замерзання калорифера. Тоді регулятор працює в черговому режимі і слідкує лише за температурою зворотного теплоносія калорифера. Також можливе використання водяного калорифера за схемою з обвідним каналом, що зображена на рис 1.7.

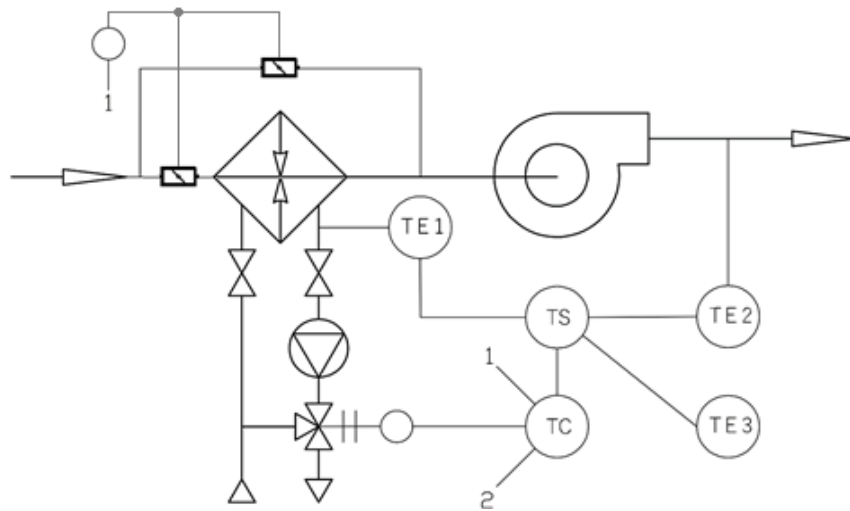


Рис. 1.7 САР температури припливного повітря з обвідним каналом калорифера

Відмінність від звичайної схеми з водяним калорифером полягає в тому, що за допомогою регулюючих заслінок, регулятор температури ТС змінює кількість припливного повітря, що проходить через калорифер. Таким чином калорифер може працювати на оптимальному режимі, а температура припливного повітря відповідатиме бажаній.

Крім водяних, в системах вентиляції також використовуються електричні калорифери, що зображено на рис. 1.8. Вони володіють рядом переваг в порівнянні з водяними і потребують менших пусково-налагоджувальних та експлуатаційних витрат. Однак враховуючи ціни на електроенергію і залежність від належного електрозабезпечення використовуються лише для об'єктів з малою, та рідше, середньою квадратурою.

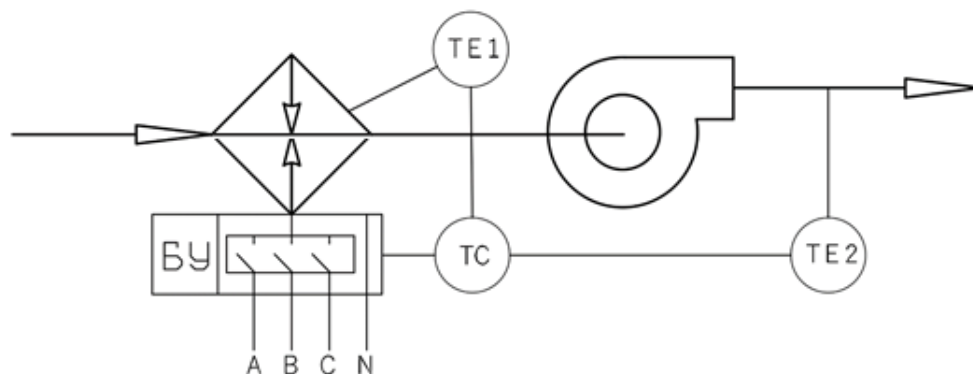


Рис. 1.8 САР температури припливного повітря з електричним калорифером

При регулюванні температури припливного повітря за допомогою електричного калорифера вимірюється температура повітря після нагнітаючого вентилятора (ТЕ2), сигнал від датчика подається на регулятор температури ТС, що керує блоком управління (БУ) електричного калорифера. Електричний калорифер може бути підключений зіркою або трикутником. Регулювання може бути дискретним, неперервним або комбінованим. Підключення електричного калорифера за схемою зірка наведено на рис. 1.9.

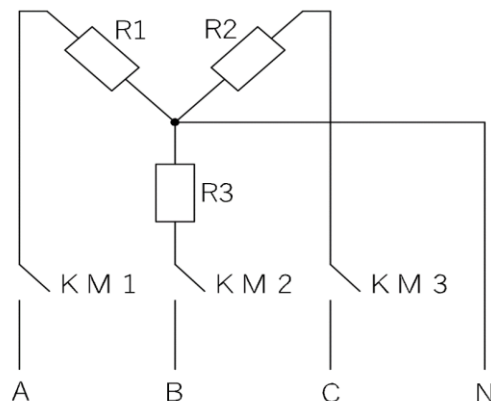


Рис. 1.9 Підключення електричного калорифера за схемою зірка

При такому підключенні електричного калорифера передбачається трьох позиційне регулювання за умови, що ТЕНи (R1, R2, R3) споживають однакову потужність і восьми позиційне, якщо ТЕНи споживають різну потужність. Таким чином замикаючи ключі (KM1, KM2, KM3) можна змінювати величину нагріву припливного повітря.

Для об'єктів, що розташовані в зонах низьких температур, або об'єктів, що потребують великої витрати припливного повітря, в системах вентиляції можуть використовуватись одночасно пара калориферів – два водяних, два електричних, або водяний і електричний. Структурну схему для першого випадку наведено на рис. 1.10.



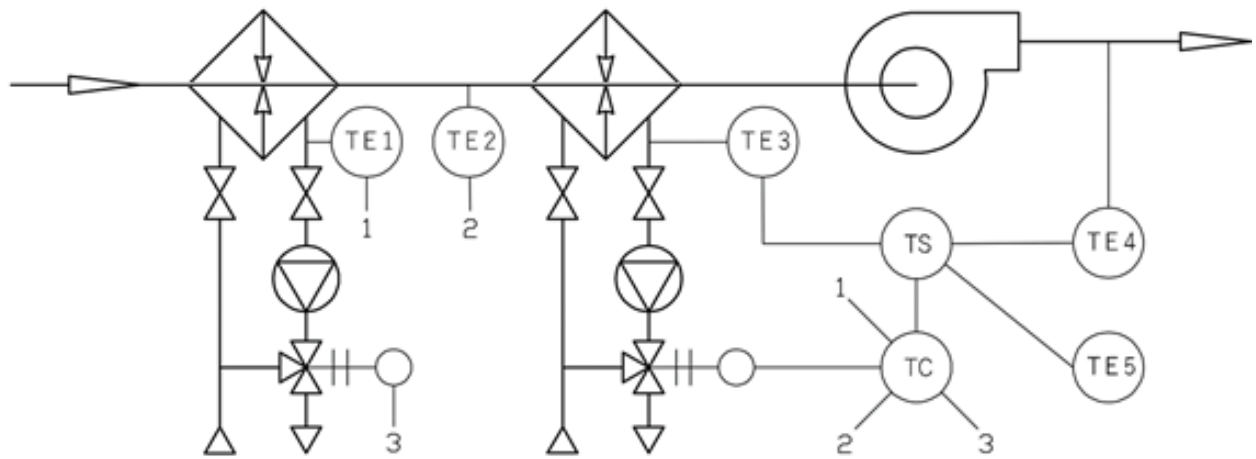


Рис. 1.10 САР температури припливного повітря з двома водяними калориферами

За допомогою датчика температури зовнішнього повітря TE5, перемикач TS встановлює режим роботи калориферів: якщо нагрівати припливного повітря не потрібно то калорифери працюють в черговому режимі; при низьких температурах зовнішнього повітря навантаження на калорифери розподіляється і перший калорифер працює на нагрів, а другий на догрів вже до потрібної температури. Крім цього за допомогою датчиків TE1 і TE3 постійно контролюється температура зворотного теплоносія обох калориферів для їх захисту від замерзання.

Припливне повітря потрібно як нагрівати, так і охолоджувати. Тому в системах вентиляції використовують водяні, або фреонові охолоджувачі разом з водяними або електрокалориферами. Слід зазначити, що їх кількість може бути різною залежно від потрібної холодинної потужності установки. Розглянемо рис. 1.11, в даному випадку використовується електричний калорифер і фреоновий охолоджувач.

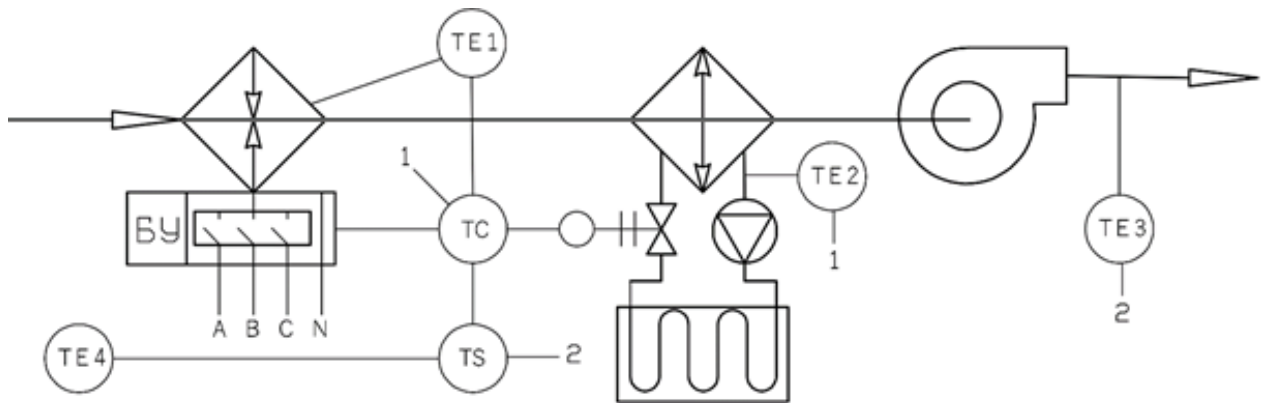


Рис. 1.11 САР температури припливного повітря з електричним калорифером і фреоновим охолоджувачем

За допомогою датчиків температури зовнішнього повітря TE4 і температури повітря в повітропроводі TE3, перемикач TS встановлює потрібний режим роботи - на нагрів, на охолодження, або вимкнено. Відповідно регулятор температури TC керує електричним калорифером, або фреоновим охолоджувачем. Принцип роботи системи вентиляції із електричним калорифером було розглянуто раніше на рисунку 1.8. Одними з головних елементів фреонового охолоджувача є терморегулюючий вентиль, що слугує для регулювання витрати рідкого холодоагенту. Це потрібно для того, щоб заповнити теплообмінник такою кількістю рідкого фреону, при якій, за час проходження через трубки теплообмінника, він міг би повністю випаруватись і не попав в компресор у рідкому стані. За допомогою датчику температури TE2 вимірюється температура перегріву фреону на виході з випарника і на основі цієї інформації регулятор керує терморегулюючим вентилем змінюючи витрату рідкого фреону в випарник. Фреоновий охолоджувач розраховується на певний сталий перепад температури на випарнику залежно від середньої температури зовнішнього повітря в теплу пору року і потрібної температури повітря в повітропроводі. Зрозуміло, що температура протягом робочого дня не завжди буде відповідати середній, а оскільки перепад температури на випарнику сталий, повітря буде переохолоджуватись, або охолоджуватись занадто. Для вирішення проблеми переохолодження можуть використовуватись на ступні рішення:

1) повітря, за допомогою калорифера, можна нагрівати перед охолоджувачем до необхідної температури, щоб після сталого перепаду температури на охолоджувачі отримати на виході з нагнітаючого вентилятора повітря заданої температури. Такий спосіб охолодження припливного повітря забезпечує стабільну роботу охолоджувача в оптимальному режимі та дозволяє швидко та якісно отримати повітря потрібної температури, однак потребує додаткових енергетичних витрат, що ростуть зі збільшенням різниці текучої і розрахункової температур;

2) використання обвідного каналу, як у випадку із водним калорифером на рисунку 1.7. Таким чином регулюючи положення обвідних клапанів можна змінювати співвідношення теплого (припливне повітря з вулиці) і холодного (повітря після випарника) повітря, при цьому нічого гріти додатково не потрібно, а охолоджувач так само працює в оптимальному режимі.

Для вирішення проблеми недостатнього охолодження існують наступні рішення:

1) зміна співвідношення свіжого і зворотного повітря в системах з рециркуляцією, що приводить до зменшення якості припливного повітря;

2) розрахунок охолоджувача на перепад температури, що забезпечить потрібну температуру припливного повітря навіть дуже теплі дні. Проте в такому випадку при зменшенні температури навколишнього повітря буде рости величина переохолодження припливного повітря;

3) використання двох охолоджувачів з різними, або однаковими холодильними потужностями показані на рис. 1.12.

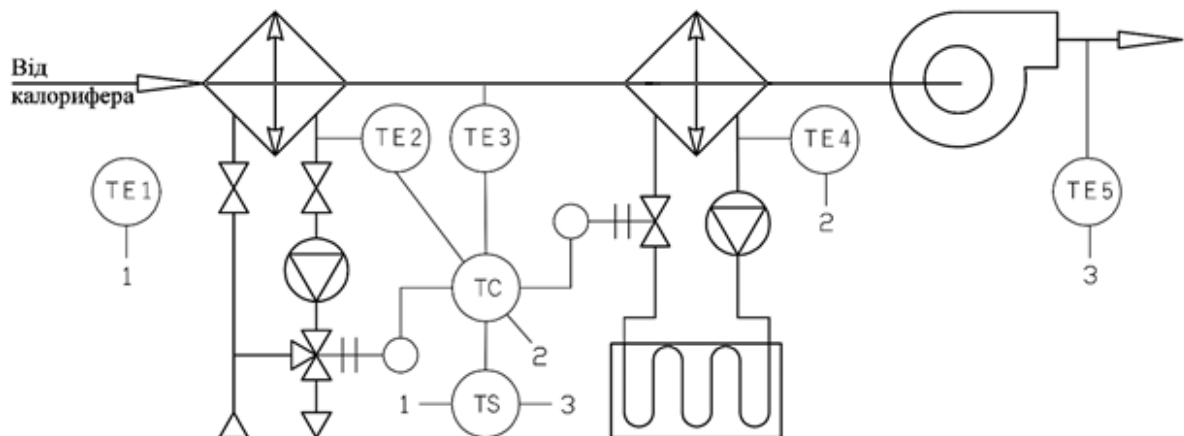


Рис. 1.12 САР температури припливного повітря з водяним і фреоновим охолоджувачем

Перемикач TS за значенням уставки і температури зовнішнього повітря (датчик TE1) встановлює режим роботи регулятора ТС, що керує водяним, або водяним разом з фреоновим охолоджувачами залежно від необхідної холодильної потужності. Якщо роботи водяного охолоджувача не вистачає для забезпечення необхідної температури припливного повітря, що вимірюється датчиком температури TE5, то в роботу додатково вступає фреоновий охолоджувач. При цьому регулюється температура повітря після водяного охолоджувача (датчик TE3) таким чином, щоб температура повітря після проходження через фреоновий охолоджувач дорівнювала уставці (датчик TE5). Датчик температури TE3 призначений для захисту водяного охолоджувача від замерзання, а датчик TE4 для контролю перегріву фреону.

Системи припливно-витяжної вентиляції рекомендується обладнувати установками для утилізації тепла витяжного повітря. Для цього використовуються системи з рециркуляцією та рекуперацією. У системах із рекуперацією використовується роторний рекуператор.

Роторні рекуператори мають найбільший ККД серед всіх інших (до 90%), рівень рекуперації легко регулюється зміною обертів ротора, при цьому позитивною особливістю таких рекуператорів є часткова передача вологи від витяжного повітря до припливного. Проте не зважаючи на очевидні переваги, роторні рекуператори мають найбільшу вартість та потребують додаткову (ізолюваної від основної системи) витяжку в санвузлах, кухнях та інших „брудних” приміщеннях, інакше повітря з неприємним запахом, чи домішками буде попадати назад в систему вентиляції і далі в приміщення, що обслуговується.

В рекуператорах з проміжним теплоносієм використовується два теплообмінники між якими циркулює водо-гліколевий розчин. Один з теплообмінників розміщений в припливному каналі, а інший в витяжному. Теплоносій нагрівається повітрям, що видаляється, і передає тепло припливного. Передача тепла може регулюватись зміною швидкості циркуляції теплоносія. Такі рекуператори мають низьку ефективність, їх ККД становить 35 – 55%.

В пластинчастих рекуператорах потоки припливного і витяжного повітря рухаються по вузьким каналам обмінюючись теплом через тонкі стінки. Такі рекуператори не мають додаткових теплоносіїв, чи рухомих елементів тому є дешевими та надійними, а їх КДД досягає 65%.

Згідно аналізу існуючих рішень для систем вентиляції було прийнято, що в системі вентиляції для даного об'єкту будуть використовуватись водяний нагрівач і водяний охолоджувач. Структурна схема такої системи наведено на рис. 1.13.

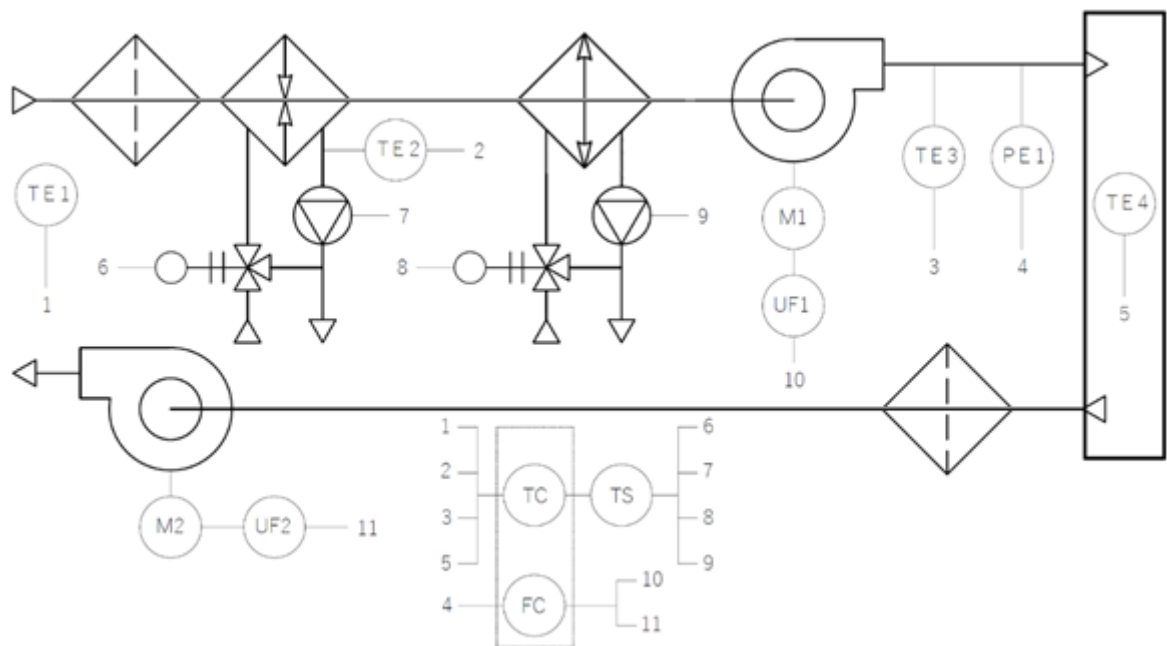


Рис. 1.13 САР температури та витрати повітря з водяним нагрівачем і охолоджувачем

Регулятор витрати FC, залежно від показів датчика тиску PE1, подає керуючий сигнал на частотні перетворювачі UF1 і UF2, що керують частотою обертів двигунів приточного та витяжного вентиляторів M1 та M2 відповідно. Повітря проходить припливного фільтр, водяний нагрівач, водяний охолоджувач і попадає в припливного канал вентиляції приміщення, звідки розподіляється з необхідною долею на всі ділянки, що обслуговуються. Регулятор температури TC, за показами датчиків температури навколишнього повітря (TE1), припливного повітря (TE3) та усередненої температури в приміщенні (TE4), подає керуючий сигнал на перемикач TS, що керує, або водяним нагрівачем, або

водяним охолоджувачем. Відпрацьоване повітря, за допомогою витяжного вентилятора, видаляється з приміщення. Така структура системи вентиляції, при мінімальних витратах електроенергії, забезпечить необхідну кількість, чистоту, свіжість та температуру повітря протягом всього року, що створить сприятливі умови для роботи і здоров'я усього персоналу.

У системі керування вентиляцією передбачені інформаційні, керуючі, захисні та допоміжні функції.

Інформаційні функції є базовими, без них функціонування системи регулювання неможливе. Існують системи, що виконують тільки інформаційні функції, такі системи називають інформаційними. У багатьох випадках створення інформаційної системи є першим кроком до створення АСР.

В розробленій АСР інформаційну функцію виконують сигнали, які надходять на входи контролера від датчиків:

- температура зовнішнього повітря;
- температура повітря у припливному повітроводі за нагнітаючим вентилятором;
- температура повітря в приміщенні;

Керуючі функції реалізують неперервне регулювання і програмно – логічне керування. Неперервне регулювання підрозділяється на: стабілізацію, відслідковування, програмне регулювання. Важливим поняттям у неперервному регулюванні є режимні параметри: температура, тиск, витрата, вологість тощо. Неперервне регулювання завжди є регулюванням конкретного режимного параметру (технологічного параметру). Стабілізація режимного параметру – це підтримання контролерами сформованих супервізорним рівнем, або введених уставок режимного параметру. Суттєвим є те, що період зміни уставок значно перевищує тривалість перехідного процесу. Це стандартний і найбільш вживаний вид регулювання. Відслідковування – це стабілізація режимного параметру за умови, що темп зміни уставки співпадає з темпом зміни перехідного процесу. Для нормально запроектованої АСР режим слідкування є нештатною ситуацією. У випадку, коли температура зміни уставки більш швидкісний ніж перехідний процес, є сенс відмовитись від регулювання взагалі. Програмне регулювання –

це відслідковування, при якому темп зміни уставки не такий швидкий, як перехідний процес.

Захисні функції системи – це коригуючі функції, які забезпечують безпечні функції керування об'єктом в екстремальних умовах. Як правило, захисні функції зводяться до попереджень (технологічних), аварійних сигналізацій і включення, або відключення тих чи інших механізмів. Особливістю захисних функцій є значна вимога до надійності їх реалізації.

Сигнали, що безпосередньо забезпечують захист та сигналізують про аварії надходять від датчиків:

- перепад тиску на фільтрі припливного повітря (сигналізує про засмічення фільтра припливного повітря);
- перепад тиску на припливного вентиляторі (сигналізує про стан припливного вентилятора);
- перепад тиску на фільтрі витяжного повітря (сигналізує про засмічення фільтра витяжного повітря);
- перепад тиску на витяжному вентиляторі (сигналізує про стан витяжного вентилятора);
- температура зворотного теплоносія калорифера;
- термостат загрози замерзання калорифера;

При виході за межі допустимих значень будь – якого з вище описаних параметрів формується відповідний візуальний сигнал на дисплеї установки, що сигналізує про аварійну ситуацію.

При перепаді тиску на вентиляторі менше 100 Па буде відображатись повідомлення про його поломку, припиниться живлення, закриються всі заслінки. При перепаді тиску вище 150 Па на фільтрі – повідомлення про його необхідну заміну. У водяному калорифері встановлюється термостат, при спрацюванні якого, установка зупиняється, а калорифер прогрівається. Це необхідно для того, щоб захистити калорифер від заморозки.

#### **1.4 Постановка задачі дослідження**

Метою роботи є розробка адаптивної системи керування припливно-витяжною системою вентиляції з рециркуляцією, яка буде підлаштовувати параметри регулятора в залежності від положення заслінки рециркуляції. Так як подібних систем на ринку не існує, тому задачу роботи можна сформулювати таким чином:

1. Дослідити актуальні методи керування системою вентиляції;
2. Отримати динамічну модель об'єкту керування. Розроблені динамічні моделі повинні враховувати температуру і витрату повітря і відображати перехідні процеси в системі за всіма необхідними каналами. Після отримання динамічних моделей необхідно проаналізувати вплив зміни температури повітря на динамічні властивості об'єкту на всьому робочому діапазоні.
3. Розрахувати адаптивний регулятор, який буде змінювати свої параметри в залежності від положення заслінки рециркуляції.
4. Розробити програмне забезпечення та інтерфейс користувача в середовищі програмування, що реалізуватиме управління описаною системою;
5. Розробити стартап-проект адаптивної системи вентиляції з рециркуляцією.



## **2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИПЛИВНО-ВИТЯЖНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ**

В розділі 1 були розглянуті основні технології вентиляції з яких видно, що основним засобом для впливу на обробку повітря для стабілізації температури є теплообмінні апарати – калорифери і охолоджувачі, які використовуються для нагрівання і для охолодження повітря відповідно. Тому це є основний елемент, динамічні характеристики якого необхідно дослідити. Математична модель апарату буде однаковою, тому що це два взаємо обернені процеси. В пункті 2.1 отримуємо математичну модель, а потім отримаємо динамічні характеристики конкретних технологічних апаратів. Так як система вентиляції є прецизійною, то на температурний режим впливає динаміка температури в приміщенні. Тому в цьому розділі ми повинні отримати характеристики двох елементів: теплообмінного апарату та приміщення.

### **2.1 Розробка математичної моделі теплообмінного апарату**

Для моделювання теплообмінних процесів у калориферах дослідники використовують аналітичні моделі із зосередженими та розподіленими параметрами. Використання розподілених моделей покращує точність розрахунків, проте, сама модель стає дещо складнішою. Із іншої сторони не завжди ускладнення моделі приводить до збільшення точності [4].

Розглянемо динамічну модель із зосередженими параметрами. Розрахункова схема водяного калорифера представлена на Рис. 2.1. При розробці динамічної моделі водяного калорифера прийнято наступні спрощення: теплообмін із навколишнім середовищем відсутній; модель містить три динамічні елементи із зосередженими параметрами (вода, теплообмінна поверхня та повітря); фізичні властивості матеріальних потоків та поверхні теплообміну приведені до усереднених значень робочого діапазону.

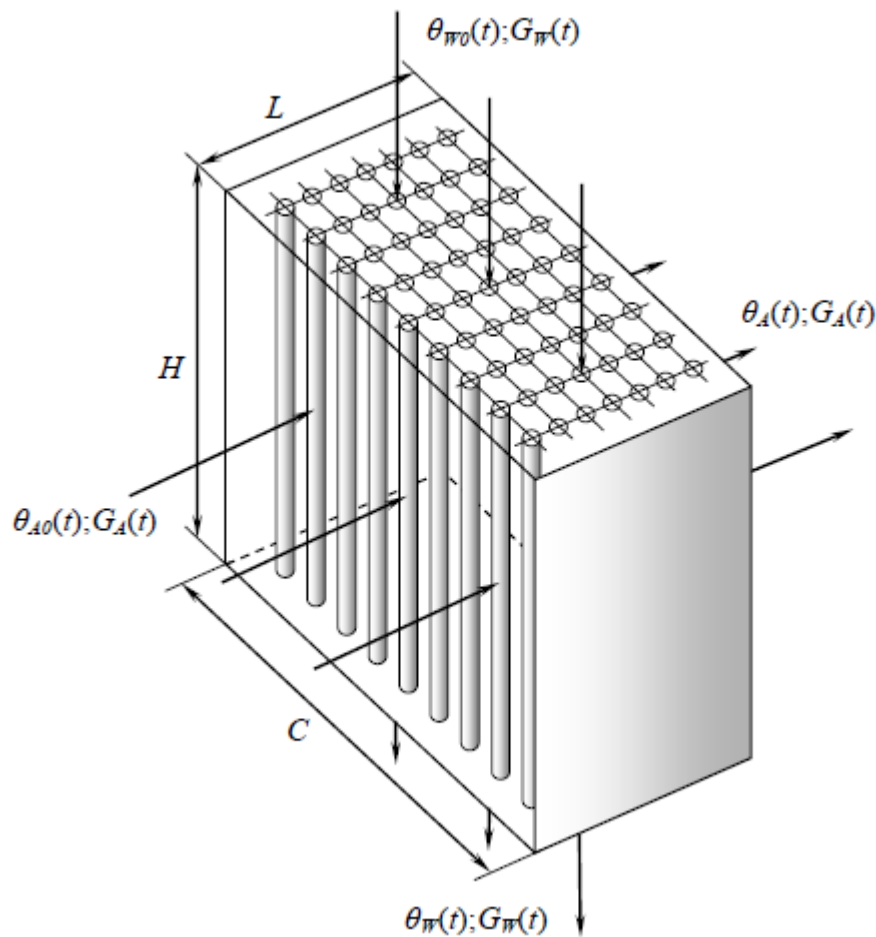


Рис. 2.1 Розрахункова схема калорифера

Гріючим теплоносієм є вода із витратою  $G_w(t)$ , температура теплоносія на вході у калорифер  $\theta_{w0}(t)$ , на виході –  $\theta_w(t)$ . Калорифер містить  $n$  трубок довжиною  $H$ . Теплоносій нагріває теплообмінні трубки, усереднена температура яких  $\theta_M(t)$ . Перехресно до руху теплоносія у калорифер надходить повітря із витратою  $G_A(t)$ . Вхідна температура повітря –  $\theta_{A0}(t)$ , вихідна –  $\theta_A(t)$ . Геометричні розміри теплообмінника:  $L$ ,  $C$ ,  $H$ , – глибина, ширина та висота калорифера.

Рівняння теплового балансу, що протікає по трубах:

$$G_w c_w (\theta_{w0} - \theta_w) - \alpha_0 F_0 (\theta_w - \theta_M) = M_w c_w \frac{d\theta_w}{dt} \quad (2.1)$$

тут  $c_w$  – теплоємність теплоносія;  $\alpha_0$  – коефіцієнт тепловіддачі між теплоносієм та внутрішньою поверхнею труб;  $F_0$  – площа внутрішньої поверхні усіх труб,  $F_0 = n \pi L d_0$ ,  $d_0$  – внутрішній діаметр труб;  $M_w$  – маса теплоносія в усіх трубах калорифера,  $M_w = n \rho_w L \pi d_0^2 / 4$ ,  $\rho_w$  – густина теплоносія. Після спрощення та лінеаризації рівняння (2.1) прийме вигляд:

$$T_W \frac{d\Delta\theta_W}{dt} + \Delta\theta_W = k_0\Delta\theta_{W0} + k_1\Delta\theta_M + k_2\Delta G_W \quad (2.2)$$

де,

$$K_W = c_W G_W + \alpha_0 F_0; T_W = \frac{c_W M_W}{K_W}; k_0 = \frac{c_W G_W}{K_W}; k_1 = 1 - k_0;$$

$$k_2 = \frac{c_W(\theta_{W0} - \theta_W)}{K_W}.$$

Тепловий баланс для теплообмінної поверхні калорифера:

$$\alpha_0 F_0 (\theta_W - \theta_M) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A) = M_M c_M \frac{d\theta_M}{dt} \quad (2.3)$$

тут  $c_M$  – теплоємкість металу;  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі між зовнішньою поверхнею труб та повітрям;  $F_1$  – площа зовнішньої поверхні теплообміну калорифера;  $M_M$  – маса металу теплообмінної поверхні. Після спрощення рівняння (2.3) отримаємо диференціальне рівняння у приростах:

$$T_M \frac{d\Delta\theta_M}{dt} + \Delta\theta_M = k_3\Delta\theta_W + k_4\Delta\theta_A \quad (2.4)$$

де,

$$K_M = \alpha_0 F_0 + \alpha_1 F_1; T_M = \frac{c_M M_M}{K_M}; k_3 = \frac{\alpha_0 F_0}{K_M}; k_4 = 1 - k_3;$$

Тепловий баланс для повітряного простору калорифера:

$$G_A c_A (\theta_{A0} - \theta_A) - \alpha_1 F_1 (\theta_M - \theta_A) = M_A c_A \frac{d\theta_A}{dt} \quad (2.5)$$

тут  $c_A$  – теплоємкість повітря;  $M_A$  – маса повітря у об'ємі  $H \times L \times C$  калорифера. Після спрощення та лінеаризації рівняння (2.5) прийме вигляд:

$$T_A \frac{d\Delta\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_5\Delta\theta_{A0} + k_6\Delta\theta_M + k_7\Delta G_A \quad (2.6)$$

де,

$$K_A = c_A G_A + \alpha_1 F_1; T_A = \frac{c_A M_A}{K_A}; k_5 = \frac{c_A G_A}{K_A}; k_6 = 1 - k_5; k_7 = \frac{c_A(\theta_{A0} - \theta_A)}{K_A};$$

Рівняння (2.2), (2.4) та (2.6) описують поведінку розглянутих динамічних елементів водяного калорифера. Математичну модель теплообміну водяного калорифера представимо системою звичайних диференціальних рівнянь:

Отже, математична модель калорифера:

$$\begin{cases} T_W \frac{d\Delta\theta_W}{dt} + \Delta\theta_W = k_0\Delta\theta_{W0} + k_1\Delta\theta_M + k_2\Delta G_W; \\ T_W \frac{d\Delta\theta_M}{dt} + \Delta\theta_M = k_3\Delta\theta_W + k_4\Delta\theta_A; \\ T_A \frac{d\Delta\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_5\Delta\theta_A + k_6\Delta\theta_M + k_7\Delta G_A; \end{cases} \quad (2.7)$$

Представимо (2.7) системою алгебраїчних рівнянь в області Лапласа.

$$\begin{cases} \Delta\theta_W(T_W p + 1) = k_0\Delta\theta_{W0} + k_1\Delta\theta_M + k_2\Delta G_W; \\ \Delta\theta_M(T_M p + 1) = k_3\Delta\theta_W + k_4\Delta\theta_A; \\ \Delta\theta_A(T_A p + 1) = k_5\Delta\theta_{A0} + k_6\Delta\theta_M + k_7\Delta G_A. \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} \Delta\theta_M(T_M p + 1) = k_3\Delta\theta_W + k_4\Delta\theta_A; \\ \Delta\theta_A(T_A p + 1) = k_5\Delta\theta_{A0} + k_6\Delta\theta_M + k_7\Delta G_A. \end{cases} \quad (2.9)$$

$$(2.10)$$

З (2.8) знаходимо  $\Delta\theta_W(p)$ ; з (2.9) визначимо  $\Delta\theta_M(p)$ , враховуючи  $\Delta\theta_W(p)$ ; знайдене  $\Delta\theta_M(p)$  підставляємо у (2.10), після групування подібних та спрощення отримаємо:

$$\Delta\theta_A = \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} [(b_2 p^2 + b_1 p + b_0)\Delta\theta_{A0} + (b_5 p^2 + b_4 p + b_3)\Delta G_A + b_6\Delta\theta_{W0} + b_7\Delta G_W] \quad (2.11)$$

де,

$$\begin{aligned} a_3 &= \frac{T_W T_M T_A}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad a_2 = \frac{T_W T_M + T_W T_A + T_M T_A}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad a_1 = \frac{T_W T_M T_A}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \\ b_0 &= \frac{k_5(1 - k_1 k_3)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad b_1 = \frac{k_5(T_W + T_M)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad b_2 = \frac{k_5 T_W T_M}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad b_3 = \frac{k_7(1 - k_1 k_3)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \\ b_4 &= \frac{k_7(T_W + T_M)}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad b_5 = \frac{k_7 T_W T_M}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad b_6 = \frac{k_0 k_3 k_6}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}; \quad b_7 = \frac{k_2 k_3 k_6}{1 - k_1 k_3 - k_4 k_6}. \end{aligned}$$

## 2.2 Структура математичної моделі теплообмінного апарату

В пункті 2.1 отримана математична модель теплообмінного апарату, яка представляється системою рівнянь (2.7). Аналізуючи математичну модель можна сказати, що так як в даній моделі керуючий параметр один, а всі інші являються збурюючими. Якщо є підмішування і використовується 3-ходовий клапан, то в цьому випадку керуючий вплив температура повітря. Якщо використовується 1-ходовий клапан (в системах вентиляції використовується в охолоджувачах) – керуючий вплив витрата, а інші збурюючі.

Так як немає зміни тисків на вході  $G_{AO}$  і виході  $G_{AO}$  (повітря не стискується) то витрата повітря не змін, тобто перехідна функція по цьому каналу  $= 1$ .

Аналіз рівняння ((2.11) дає можливість намалювати структурну схему зображену на рис.2.2, яка показує, що на вихідну температуру  $\theta_A$  впливають такі параметри:  $\theta_{AO}$  – вхідна температура повітря,  $G_{AO}$  – витрата повітря,  $\theta_{WO}$  – вхідна температура води,  $G_{WO}$  – вхідна витрата води. Результуючим є  $\theta_A$  – вихідна температура повітря та  $G_A$  – вихідна витрата повітря через калорифер.

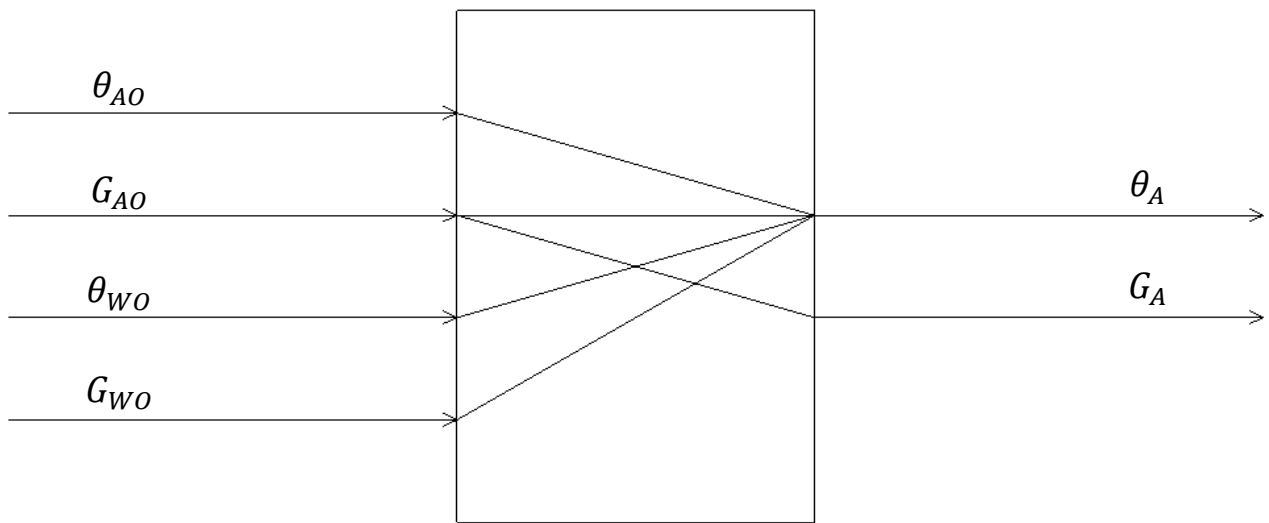


Рис. 2.2 Структура впливів динамічних елементів

### 2.3 Моделювання перехідних процесів для калорифера

Рівняння (2.11) можна розв'язувати аналітичними способами або чисельним способом. Застосовуючи зворотне перетворення Лапласа, можна знайти аналітичний розв'язок (2.11) за каналами регулювання та збурення. Будемо використовувати чисельний варіант за допомогою Matlab.

За динамічною моделлю (2.11) проведемо моделювання перехідних процесів для водяного калорифера ВНВ 243, який виготовляється фірмою ВЕЗА [8]. У табл. 2.1 подано теплофізичні величини для калорифера ВЕЗА ВНВ 243.

Таблиця 2.1 Теплофізичні параметри та величини водяного калорифера ВЕЗА ВНВ 243

№ п. п.	Назва параметру	Позначення	Числове значення	Розмірність
1.	Габарити водяного калорифера	$H \times C \times L$	1570×1.965×0.18	<i>м</i>
2.	Витрата води	$G_w$	2.44	<i>кг/сек</i>
3.	Густина води	$\rho_w$	986	<i>кг/м<sup>3</sup></i>
4.	Теплоємність води	$c_w$	4185	<i>Дж/(кг<sup>0</sup>С)</i>
5.	Маса води у калорифері	$M_w$	18.54	<i>кг</i>
6.	Площа внутрішньої поверхні теплообміну	$F_0$	6.54	<i>м<sup>2</sup></i>
7.	Коефіцієнт тепловіддачі для внутрішньої поверхні	$\alpha_0$	800	<i>Вт/(м<sup>2</sup><sup>0</sup>С)</i>
8.	Густина металу трубчатки	$\rho_M$	3334.8	<i>кг/м<sup>3</sup></i>
9.	Теплоємність металу	$c_M$	866.5	<i>Дж/(кг<sup>0</sup>С)</i>
10.	Маса теплообмінної трубчатки	$M_M$	21	<i>кг</i>
11.	Площа зовнішньої поверхні теплообміну	$F_1$	274	<i>м<sup>2</sup></i>
12.	Коефіцієнт тепловіддачі для зовнішньої поверхні	$\alpha_1$	80	<i>Вт/(м<sup>2</sup><sup>0</sup>С)</i>

Продовження таблиці 2.1

13.	Витрата повітря через калорифер	$G_A$	16.67	<i>кг/сек</i>
-----	---------------------------------	-------	-------	---------------

14.	Густина повітря	$\rho_A$	1.2	$\text{кг/м}^3$
15.	Теплоємність повітря	$c_A$	1010	$\text{Дж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$
16.	Маса повітря у калорифері	$M_A$	2.76	$\text{кг}$
17.	Вхідна температура води	$\theta_{w0}$	90	$^\circ\text{C}$
18.	Вихідна температура води	$\theta_w$	70	$^\circ\text{C}$
19.	Вхідна температура повітря	$\theta_{A0}$	0	$^\circ\text{C}$
20.	Вихідна температура повітря	$\theta_A$	18	$^\circ\text{C}$

Параметри моделі (2.11) визначимо за допомогою розрахунку в середовищі Matlab для цього була створена програма, лістинг якої представлений нижче:

```
Gw=2.44;
pw=986;
cw=4185;
Mw=18.54;
F0=6.54;
a0=800;
pm=3334.8;
cm=866.5;
Mm=21;
F1=274;
a1=80;
Ga=16.67;
pa=1.2;
ca=1010;
Ma=2.76;
Ow0=90;
Ow=70;
Oao=0;
Oa=18;
Ka=ca*Ga+a1*F1;
Km=a0*F0+a1*F1;
Kw=cw*Gw+a0*F0;
```

```

Ta= (ca*Ma) /Ka;
Tw= (cw*Mw) /Kw;
Tm= (cm*Mm) /Km;
k0= (cw*Gw) /Kw;
k1=1-k0;
k2=cw* (Ow0-Ow) /Kw;
k3= (a0*F0) /Km;
k4=1-k3;
k5= (ca*Ga) /Ka;
k6=1-k5;
k7= (ca* (Oao-Oa) ) /Ka;
a3= (Tw*Tm*Ta) / (1-k1*k3-k4*k6) ;
a2= (Tw*Tm+Tw*Ta+Tm*Ta) / (1-k1*k3-k4*k6) ;
a1= (Tw+Tm+Ta-k1*k3*Ta-k4*k6*Tw) / (1-k1*k3-k4*k6) ;
b0= (k5* (1-k1*k3) ) / (1-k1*k3-k4*k6) ;
b1= (k5* (Tw+Tm) ) / (1-k1*k3-k4*k6) ;
b2= (k5*Tw*Tm) / (1-k1*k3-k4*k6) ;
b3= (k7* (1-k1*k3) ) / (1-k1*k3-k4*k6) ;
b4= (k7* (Tw+Tm) ) / (1-k1*k3-k4*k6) ;
b5= (k7*Tw*Tm) / (1-k1*k3-k4*k6) ;
b6= (k0*k3*k6) / (1-k1*k3-k4*k6) ;
b7= (k2*k3*k6) / (1-k1*k3-k4*k6) ;

```

За результатом розрахунку програми отримано чисельні значення для рівняння (2.11), які представлено нижче:

$$\begin{aligned}
 w^{\theta_{AO} \rightarrow \Delta \theta_A}(p) &= \frac{3.06p^2 + 5.17p + 0.85}{0.51p^3 + 7.90p^2 + 7.25p + 1} \\
 w^{G_A \rightarrow \Delta \theta_A}(p) &= \frac{-3.30p^2 - 5.59p - 0.92}{0.51p^3 + 7.90p^2 + 7.25p + 1} \\
 w^{\theta_{W0} \rightarrow \Delta \theta_A}(p) &= \frac{0.15}{0.51p^3 + 7.90p^2 + 7.25p + 1} \\
 w^{G_W \rightarrow \Delta \theta_A}(p) &= \frac{1.24}{0.51p^3 + 7.90p^2 + 7.25p + 1}
 \end{aligned}$$

Математичну модель (2.11) розв'язуємо за допомогою Matlab в середовищі Simulink і отримуємо динамічні характеристики калорифера за всіма каналами і регулювання і збурення.

Модель даного калорифера в середовищі Matlab Simulink показана на рис. 2.3:



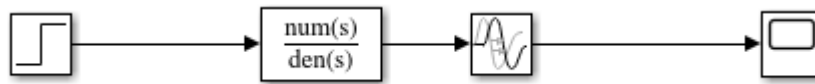


Рис. 2.3 Модель калорифера в Simulink

Отримали перехідні процеси моделі калорифера за всіма каналами показані на рис. 2.4:

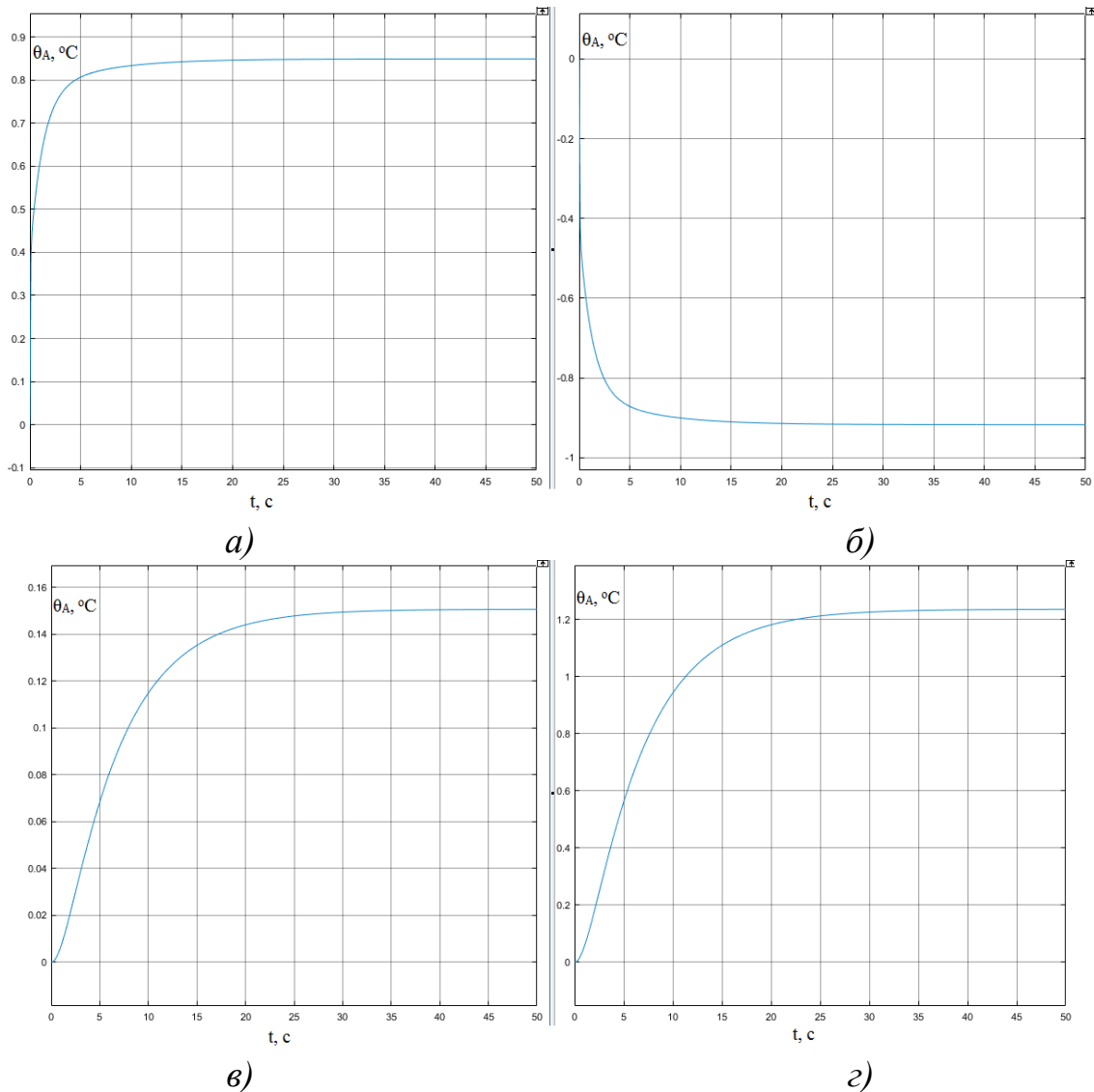


Рис. 2.4 Перехідні процеси моделі калорифера ВЕЗА ВНВ 243 за каналами впливу:

а)  $\Delta\theta_{A0} \rightarrow \Delta\theta_A$ ,  $\Delta\theta_{A0} = 1^\circ\text{C}$ ; б)  $\Delta G_{A0} \rightarrow \Delta\theta_A$ ,  $\Delta G_{A0} = 1 \text{ кг/с}$ ;

в)  $\Delta\theta_{W0} \rightarrow \Delta\theta_A$ ,  $\Delta\theta_{W0} = 1^\circ\text{C}$ ; г)  $\Delta G_{W0} \rightarrow \Delta\theta_A$ ,  $\Delta G_{W0} = 0.01 \text{ кг/сек}$

Отже, на рис. 2.4, а) та рис. 2.4, б) ми бачимо незначну інерційність процесу. На рис. 2.4, в) та рис. 2.4, г) процес не такий швидкодіючий так як іде передача через стінку і спочатку потрібно нагріти метал, а потім метал гріє повітря.

## 2.4 Моделювання перехідних процесів для охолоджувача

Калорифер ВНВ 243 є аналогічним до охолоджувача ВОВ 243 по своїй структурі, відмінним є лише те, що в калорифері ВНВ 243 в якості теплоносія використовується гаряча вода, а в охолоджувачі ВОВ 243 в якості енергоносія використовується холодна вода, розчини етиленгліколя та пропіленгліколя. У табл. 2.2 подано теплофізичні величини для охолоджувача ВЕЗА ВОВ 243.

Таблиця 2.2 Теплофізичні параметри та величини водяного охолоджувача ВЕЗА ВОВ 243

№ п. п.	Назва параметру	Позначення	Числове значення	Розмірність
1.	Габарити водяного охолоджувача	$H \times C \times L$	$1570 \times 2.9475 \times 0.18$	<i>м</i>
2.	Витрата води	$G_w$	2	<i>кг/сек</i>
3.	Густина води	$\rho_w$	986	<i>кг/м<sup>3</sup></i>
4.	Теплоємність води	$c_w$	4185	<i>Дж/(кг<sup>0</sup>С)</i>
5.	Маса води у калорифері	$M_w$	27.81	<i>кг</i>
6.	Площа внутрішньої поверхні теплообміну	$F_0$	9.81	<i>м<sup>2</sup></i>
7.	Коефіцієнт тепловіддачі для внутрішньої поверхні	$\alpha_0$	700	<i>Вт/(м<sup>2</sup><sup>0</sup>С)</i>
8.	Густина металу трубчатки	$\rho_M$	3334.8	<i>кг/м<sup>3</sup></i>

Продовження таблиці 2.2

9.	Теплоємність металу	$c_M$	866.5	<i>Дж/(кг<sup>0</sup>С)</i>
10.	Маса теплообмінної трубчатки	$M_M$	31.5	<i>кг</i>
11.	Площа зовнішньої поверхні теплообміну	$F_1$	411	<i>м<sup>2</sup></i>

12.	Коефіцієнт тепловіддачі для зовнішньої поверхні	$\alpha_1$	80	$Вт/(м^2\ ^\circ C)$
13.	Витрата повітря через охолоджувач	$G_A$	16.67	$кг/сек$
14.	Густина повітря	$\rho_A$	1.2	$кг/м^3$
15.	Теплоємність повітря	$c_A$	1010	$Дж/(кг\ ^\circ C)$
16.	Маса повітря у калорифері	$M_A$	4.14	$кг$
17.	Вхідна температура води	$\theta_{w0}$	6	$^\circ C$
18.	Вихідна температура води	$\theta_w$	12	$^\circ C$
19.	Вхідна температура повітря	$\theta_{A0}$	28	$^\circ C$
20.	Вихідна температура повітря	$\theta_A$	20	$^\circ C$

Так як моделі калорифера і охолоджувача аналогічні, то за допомогою програми в Matlab визначимо параметри моделі охолоджувача.

За результатом розрахунку програми отримано чисельні значення для рівняння (2.11), які представлено нижче:

$$w^{\theta_{A0} \rightarrow \Delta\theta_A}(p) = \frac{4.74p^2 + 7.52p + 0.83}{1.18p^3 + 15.85p^2 + 11.26p + 1}$$

$$w^{G_A \rightarrow \Delta\theta_A}(p) = \frac{2.27p^2 + 3.61p + 0.40}{1.18p^3 + 15.85p^2 + 11.26p + 1}$$

$$w^{\theta_{w0} \rightarrow \Delta\theta_A}(p) = \frac{0.17}{1.18p^3 + 15.85p^2 + 11.26p + 1}$$

$$w^{G_W \rightarrow \Delta\theta_A}(p) = \frac{-0.50}{1.18p^3 + 15.85p^2 + 11.26p + 1}$$

Перехідні процеси для охолоджувача шукаємо за допомогою Matlab в середовищі Simulink і отримуємо динамічні характеристики охолоджувача за всіма каналами і регулювання і збурення. Отримані перехідні процеси моделі калорифера за всіма каналами зображені на рис. 2.5:

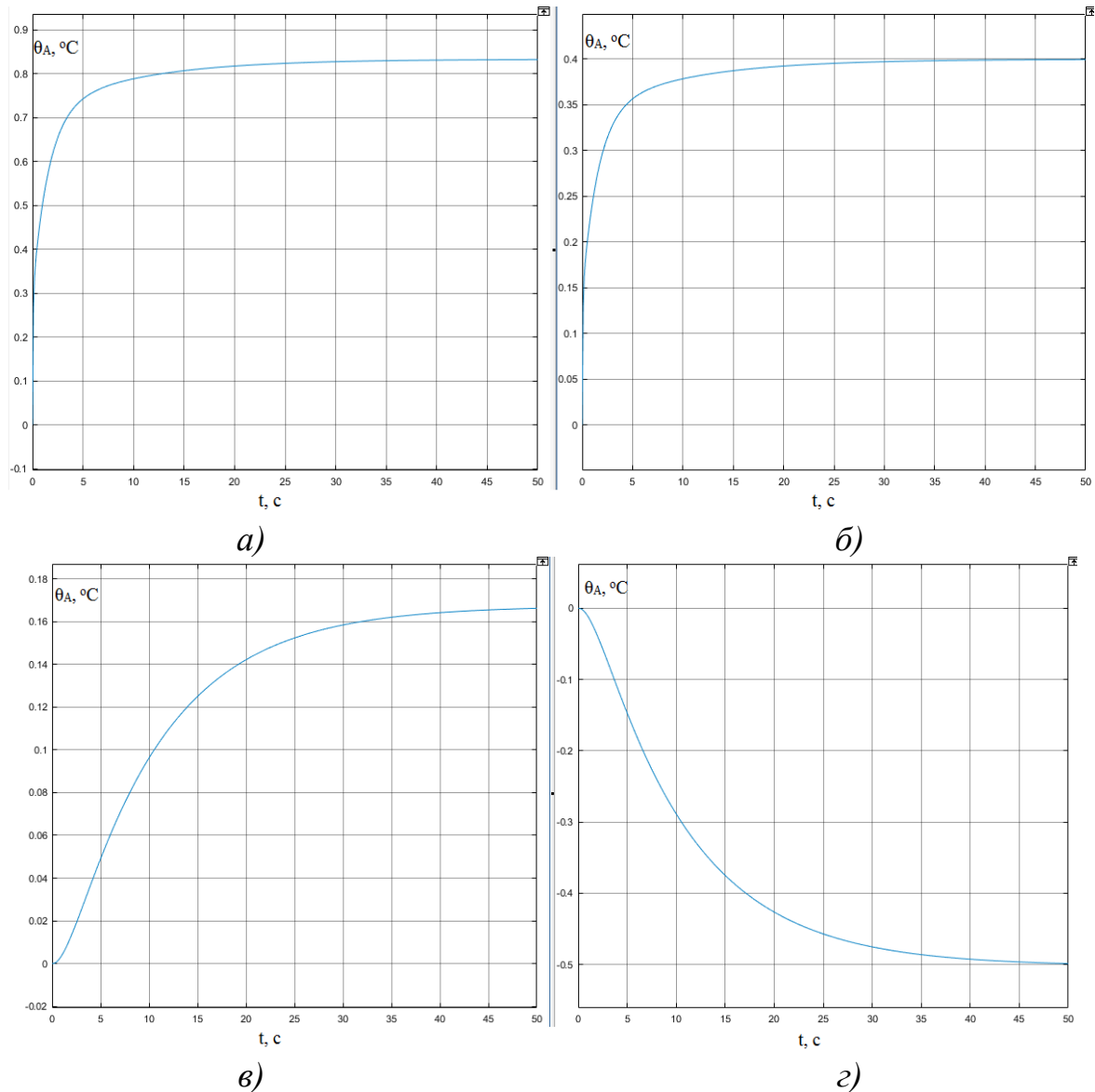


Рис. 2.5 Перехідні процеси моделі охолоджувача за каналами впливу:

а)  $\Delta\theta_{A0} \rightarrow \Delta\theta_A, \Delta\theta_{A0} = 1^\circ\text{C}$ ; б)  $\Delta G_{A0} \rightarrow \Delta\theta_A, \Delta G_{A0} = 1 \text{ кг/с}$ ;

в)  $\Delta\theta_{W0} \rightarrow \Delta\theta_A, \Delta\theta_{W0} = 1^\circ\text{C}$ ; г)  $\Delta G_{W0} \rightarrow \Delta\theta_A, \Delta G_{W0} = 0.01 \text{ кг/сек}$

## 2.5 Розробка математичної моделі приміщення

Метою є розробка математичної моделі приміщення для синтезу та аналізу прецизійних систем керування, де враховується динаміка тепломасообмінних процесів у приміщенні.

Під час розробки систем прецизійного керування системою вентиляції необхідно враховувати динамічні властивості приміщення. Розглянемо розрахункову схему приміщення, яка зображена на рис. 2.6.

У повітряний простір приміщення об'ємом  $V_A = H \times L \times C$  із припливної системи вентиляції надходить підготовлене повітря, температура якого  $\theta_{Ao}(t)$ , вологовміст  $d_{Ao}(t)$ , витрата  $G_A(t)$ . У процесі теплообміну між технологічним обладнанням (потужність обладнання  $N_E$  та стінами (температура стіни  $\theta_S$ ) у приміщенні встановлюється температура повітря  $\theta_A(t)$  із вологовмістом  $d_A(t)$ . Витяжна система вентиляції забезпечує відвід повітря. Температура навколишнього повітря –  $\theta_N(t)$ .

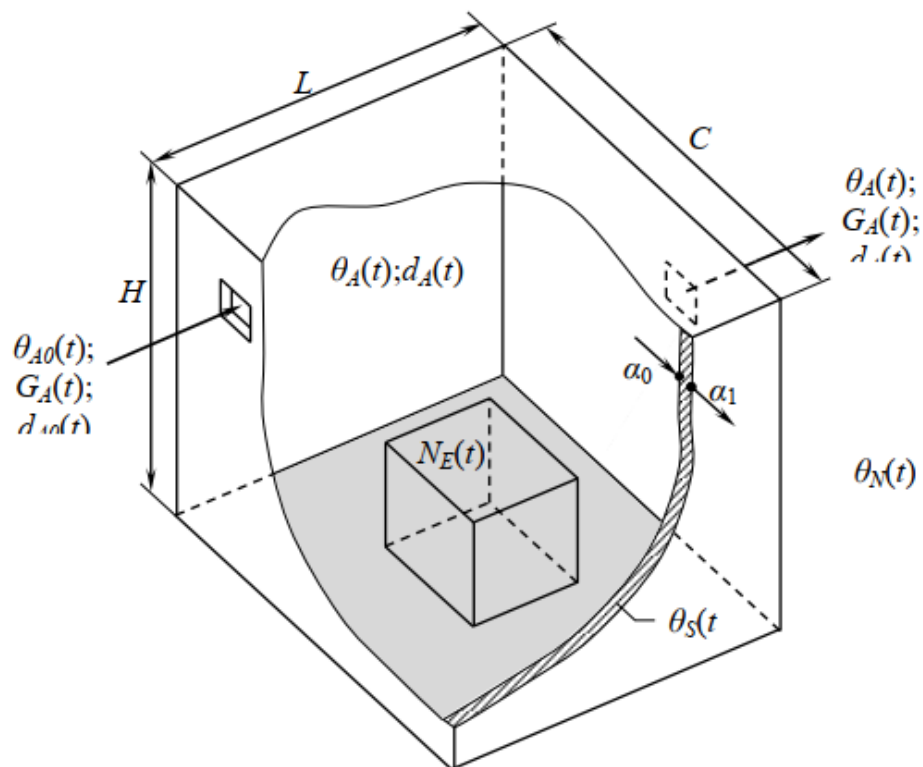


Рис. 2.6 Розрахункова схема приміщення

За основу моделі приміщення взято проточну ємність. При моделюванні прийнято наступні спрощення: в приміщенні відсутні джерела вологовиділення, оскільки їх наявність визначається конкретним технологічним процесом, який не розглядається; моделювання збурення вологості в приміщенні пропонується проводити змінною  $d_{Ao}$ ; приведена теплова потужність технологічного та теплотехнічного обладнання  $N_E(t)$  враховує тепловиділення обслуговуючого

персоналу; модель містить два динамічні елементи із зосередженими параметрами (повітряний простір та стіни приміщення); фізичні властивості матеріальних потоків та поверхні теплообміну приведені до усереднених значень робочого діапазону [7]. Теплові та матеріальний баланси для динамічних елементів динамічної моделі приміщення представлено системою диференційних рівнянь:

$$\begin{cases} G_A c_A (\theta_{AO} - \theta_A) - \alpha_0 F_0 (\theta_A - \theta_S) + N_E = c_A M_A \frac{d\theta_A}{dt} \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} \alpha_0 F_0 (\theta_A - \theta_S) - \alpha_1 F_1 (\theta_S - \theta_N) = c_S M_S \frac{d\theta_S}{dt} \end{cases} \quad (2.13)$$

тут  $c_A, c_S$  – відповідно теплоємність повітря та матеріалу стіни;  $\alpha_0, \alpha_1$ , відповідно коефіцієнт тепловіддачі всередині приміщення (між повітрям та внутрішньою поверхнею стіни  $F_0$ ) та ззовні (між зовнішньою поверхнею стіни  $F_1$  та навколишнім повітрям із температурою  $\theta_S$ );

$M_A$  – маса повітря у об'ємі  $V_A$ ;  $M_S$  – загальна маса матеріалу стін;  $\rho_A$  – густина повітря.

Рівняння (2.12) та (2.13) описують теплові баланси для повітряного простору та теплоізолюючої стіни приміщення.

Після групування подібних та лінеаризації (2.12) – (2.13) маємо:

$$\begin{cases} T_A \frac{d\Delta\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_0 \Delta\theta_{AO} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta\theta_S + k_3 \Delta N_E; \\ T_S \frac{d\Delta\theta_S}{dt} + \Delta\theta_S = k_4 \Delta\theta_A + k_5 \Delta\theta_N \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\text{де } K_A = c_A G_A + \alpha_0 F_0; \quad K_S = \alpha_0 F_0 + \alpha_1 + F_1; \quad T_A = \frac{c_A M_A}{K_A}; \quad T_S = \frac{c_S M_S}{K_S};$$

$$k_0 = \frac{c_A G_A}{K_A}; \quad k_1 = \frac{\theta_{AO} - \theta_A}{K_A}; \quad k_3 = \frac{1}{K_A}; \quad k_4 = \frac{\alpha_0 F_0}{K_A}; \quad k_5 = 1 - k_4; \quad k_6 = 1; \quad k_7 = \frac{d_{AO} - d_A}{G_A}.$$

Розглянемо систему (2.14) у області Лапласа.

$$\begin{cases} \Delta\theta_A (T_A p + 1) = k_0 \Delta\theta_{AO} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta\theta_S + k_3 \Delta N_E \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} \Delta\theta_S (T_S p + 1) = k_4 \Delta\theta_A + k_5 \Delta\theta_N \end{cases} \quad (2.16)$$

Із (2.15) знаходимо  $\Delta\theta_A$ , враховуючи (2.16). Після групування подібних отримаємо:

$$\Delta\theta_A = \frac{1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} [(b_1 p + b_0) \Delta\theta_{AO} + (b_3 p + b_2) \Delta G_A + (b_5 p + b_4) \Delta N_E + b_6 \Delta\theta_N], \quad 2.17$$

$$\text{де } \alpha_1 = \frac{T_A + T_S}{1 - k_2 k_4}; \alpha_2 = \frac{T_A T_S}{1 - k_2 k_4}; b_0 = \frac{k_0}{1 - k_2 k_4}; b_1 = \frac{k_1}{1 - k_2 k_4}; b_3 = \frac{k_1 T_S}{1 - k_2 k_4}; b_4 = \frac{k_1 T_S}{1 - k_2 k_4}; b_5 = \frac{k_3 T_S}{1 - k_2 k_4}; b_6 = \frac{k_2 k_5}{1 - k_2 k_4}.$$

## 2.6 Моделювання перехідних процесів для приміщення

За динамічною моделлю проведено моделювання перехідних процесів за основними каналами впливу для приміщення об'ємом  $V_A = 3.3\text{м} \times 30\text{м} \times 30\text{м} = 2970 \text{ м}^3$ . У табл. 2.3 подано теплофізичні параметри для приміщення.

Таблиця 2.3 Параметри та теплофізичні величини приміщення

№ п. п.	Назва параметру	Позначення	Числове значення	Розмірність
1.	Габарити приміщення	$H \times C \times L$	$3.3 \times 30 \times 30$	$\text{м}$
2.	Густина повітря	$\rho_A$	1.2	$\text{кг}/\text{м}^3$
3.	Об'єм повітряного простору у приміщенні	$V_A$	2970	$\text{м}^3$
4.	Витрата повітря в приміщенні	$G_A$	16.67	$\text{кг}/\text{с}$
5.	Теплоємність повітря	$c_A$	1010	$\text{Дж}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$
6.	Маса повітря в калорифері	$M_A$	3564	$\text{кг}$
7.	Площа теплообміну внутрішньої поверхні стінки	$F_O$	1296	$\text{м}^2$

Продовження таблиці 2.3

8.	Коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні стінки	$\alpha_O$	8.7	$\text{Вт}/(\text{м}^2 ^\circ\text{C})$
9.	Густина цегляної стінки	$\rho_S$	1750	$\text{кг}/\text{м}^3$
10.	Теплоємність цегляної стінки	$c_S$	920	$\text{Дж}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$

11.	Маса цегляної стінки	$M_S$	544320	кг
12.	Площа теплообміну зовнішньої поверхні стіни	$F_1$	1342.6	м <sup>2</sup>
13.	Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні стіни	$\alpha_1$	23	Вт/(м <sup>2</sup> °C)
14.	Вхідна температура повітря	$\theta_{Ao}$	19.7	°C
15.	Вихідна температура повітря	$\theta_A$	20	°C

В середовищі Matlab створимо m-файл, який містить всі параметри приміщення для визначення перехідних процесів. Код m-файлу:

```

pa=1.2;
Va=2970;
Ga=16.67;
ca=1010;
Ma=3564;
F0=1296;
a10=8.7;
ps=1750;
cs=920;
Ms=544320;
F1=1342.6;
a11=23;
Oao=19.7;
Oa=20;
Ka=(ca*Ga)+(a10*F0);
Ks=(a10*F0)+(a11*F1);
Ta=((ca*Ma)/Ka);
Ts=((cs*Ms)/Ks);
k0=((ca*Ga)/Ka);
k1=((Oao-Oa)/Ka);
k2=((a10*F0)/Ka);
k3=1/Ka;
k4=((a10*F0)/Ks);
k5=1-k4;
k6=1;
a1=((Ta+Ts)/(1-k2*k4));
a2=((Ta*Ts)/(1-k2*k4));
b0=((k0)/(1-k2*k4));
b1=((k0*Ts)/(1-k2*k4));

```



```

b2=((k1)/(1-k2*k4));
b3=((k1*Ts)/(1-k2*k4));
b4=((k3)/(1-k2*k4));
b5=((k3*Ts)/(1-k2*k4));
b6=((k2*k5)/(1-k2*k4));

```

За результатом розрахунку програми отримано чисельні значення для рівняння (2.17), які представлено нижче:

$$w^{\theta_{AO} \rightarrow \Delta \theta_A}(p) = \frac{593.44p + 0.05}{4.91 * 10^{-6}p^2 + 1.64 * 10^{-6}p + 1}$$

$$w^{G_A \rightarrow \Delta \theta_A}(p) = \frac{-0.41p - 3.45 * 10^{-5}}{4.91 * 10^{-6}p^2 + 1.64 * 10^{-6}p + 1}$$

$$w^{N_E \rightarrow \Delta \theta_A}(p) = \frac{1.37p + 1.15 * 10^{-4}}{4.91 * 10^{-6}p^2 + 1.64 * 10^{-6}p + 1}$$

$$w^{\theta_N \rightarrow \Delta \theta_A}(p) = \frac{0.95}{4.91 * 10^{-6}p^2 + 1.64 * 10^{-6}p + 1}$$

## 2.7 Математична модель припливно-витяжної системи вентиляції із рециркуляцією

Для аналізу основних керуючих та збурюючих впливів на ПВСВ розглянемо технологічну схему, зображену на рис. 2.7:

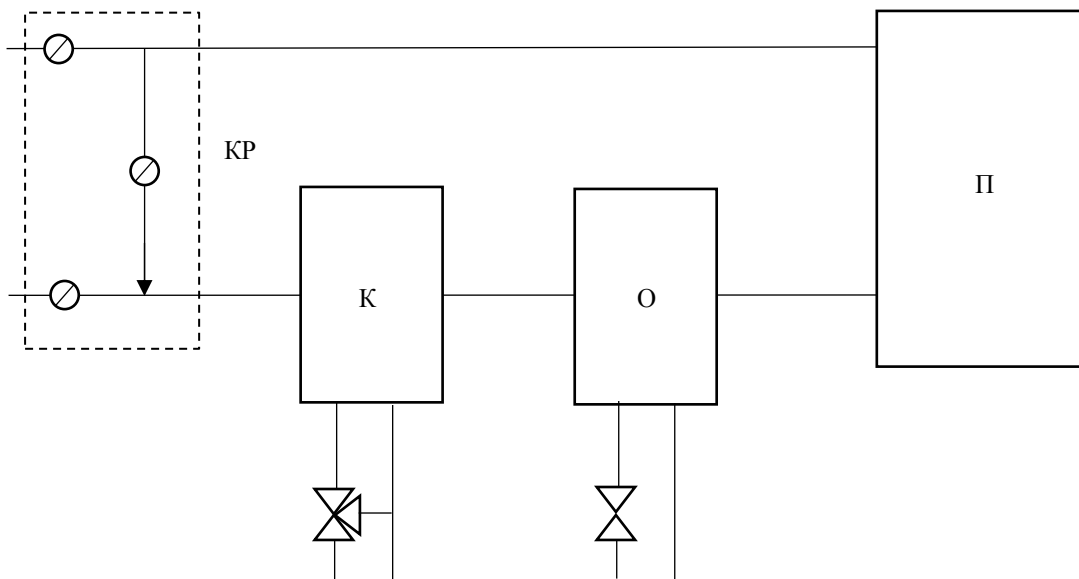


Рис. 2.7 Технологічна схема

Основними структурними елементами ПВСВ із рециркуляцією є: калорифер К; охолоджувач О; приміщення П; камера рециркуляції КР та трубопроводи.

На основі технологічної схеми сформуємо структурну схему впливів на ПВСВ, що зображена на рис. 2.8. Отже, отримаємо динамічну модель ПВСВ для синтезу системи керування.

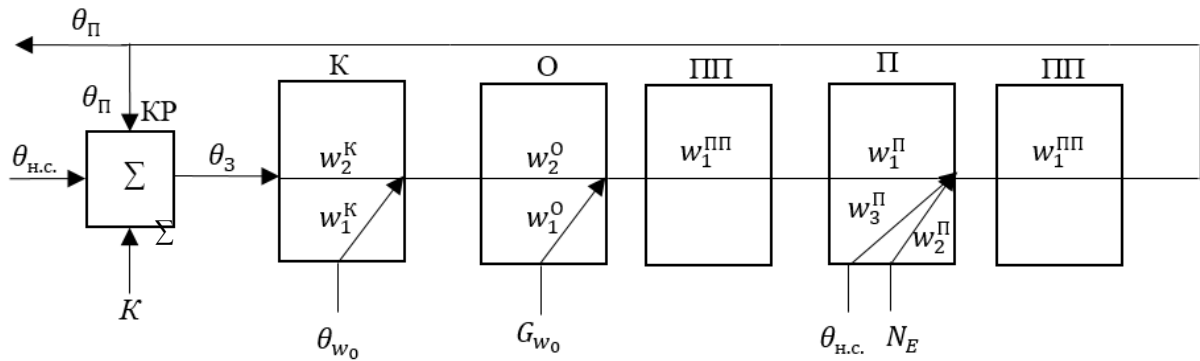


Рис. 2.8 Структурна схема ПВСВ із рециркуляцією

Після структурних перетворень (рис. 2.8) отримано спрощену структурну схему ПВСВ, яка зображена на рис. 2.9.

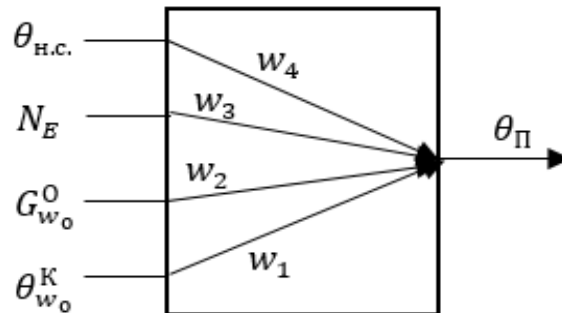


Рис. 2.9 Спрощена структурна схема

Передатні функції каналів впливу шукають за залежностями:

$$w_1 = \frac{\theta_{\Pi}}{\theta_{w_0}^K} = w_1^K w_2^O w_1^{\Pi} w_1^{\Pi\Pi}$$

$$w_2 = \frac{\theta_{\Pi}}{G_{w_0}^O} = w_1^O w_1^{\Pi} w_1^{\Pi\Pi}$$

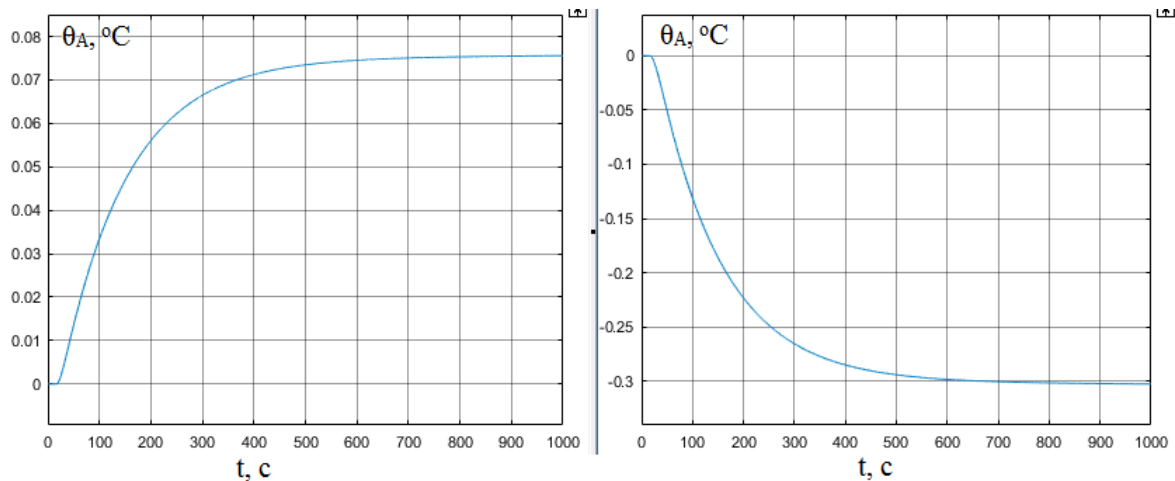
$$w_3 = \frac{\theta_{\Pi}}{N_E} = w_2^{\Pi} w_1^{\Pi\Pi}$$

$$\begin{aligned}\theta_{\Pi} &= (K\theta_{\Pi} + (1-K)\theta_{\text{н.с.}})w_2^K w_2^0 w_1^{\Pi} w_1^{\Pi\Pi} \\ \theta_{\Pi} - K\theta_{\Pi} w_2^K w_2^0 w_1^{\Pi} &= (1-K)\theta_{\text{н.с.}} w_2^K w_2^0 w_1^{\Pi} \\ \theta_{\Pi}(1 - K w_2^K w_2^0 w_1^{\Pi}) &= \theta_{\text{н.с.}}(1-K)w_2^K w_2^0 w_1^{\Pi} \\ w_4 = \frac{\theta_{\Pi}}{\theta_{\text{н.с.}}} &= \frac{(1-K)w_2^K w_2^0 w_1^{\Pi} w_1^{\Pi\Pi}}{1 - K w_2^K w_2^0 w_1^{\Pi}} + w_3^{\Pi} w_1^{\Pi\Pi}\end{aligned}$$

де  $K$  – коефіцієнт рециркуляції ( $K=0\dots 1$ );  $w_1^K, w_2^K, w_1^0, w_2^0, w_1^{\Pi} w_2^{\Pi}, w_3^{\Pi}, w_1^{\Pi\Pi}$  – передатні функції обладнання та приміщення.

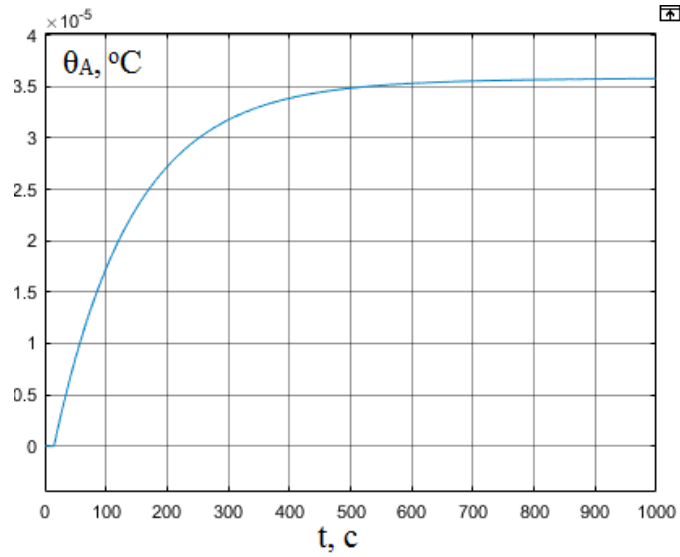
$$\begin{aligned}w_1 &= \frac{0.15}{0.51p^3 + 7.90p^2 + 7.25p + 1} * \frac{4.74p^2 + 7.52p + 0.83}{1.18p^3 + 15.85p^2 + 11.26p + 1} * \frac{593.44p + 0.05}{4.91 \cdot 10^{-6}p^2 + 1.64 \cdot 10^{-6}p + 1} * e^{-30p} \\ w_2 &= \frac{-0.50}{1.18p^3 + 15.85p^2 + 11.26p + 1} * \frac{593.44p + 0.05}{4.91 \cdot 10^{-6}p^2 + 1.64 \cdot 10^{-6}p + 1} * e^{-30p} \\ w_3 &= \frac{1.37p + 1.15 \cdot 10^{-4}}{4.91 \cdot 10^{-6}p^2 + 1.64 \cdot 10^{-6}p + 1} * e^{-30p} \\ w_4 &= \\ &= \frac{(1-K) \frac{3.06p^2 + 5.17p + 0.85}{0.51p^3 + 7.90p^2 + 7.25p + 1} * \frac{4.74p^2 + 7.52p + 0.83}{1.18p^3 + 15.85p^2 + 11.26p + 1} * \frac{593.44p + 0.05}{4.91 \cdot 10^{-6}p^2 + 1.64 \cdot 10^{-6}p + 1} * e^{-30p}}{1 - K * \frac{3.06p^2 + 5.17p + 0.85}{0.51p^3 + 7.90p^2 + 7.25p + 1} * \frac{4.74p^2 + 7.52p + 0.83}{1.18p^3 + 15.85p^2 + 11.26p + 1} * \frac{593.44p + 0.05}{4.91 \cdot 10^{-6}p^2 + 1.64 \cdot 10^{-6}p + 1}} \\ &+ \frac{0.95}{4.91 \cdot 10^{-6}p^2 + 1.64 \cdot 10^{-6}p + 1} * e^{-30p}\end{aligned}$$

Графічне зображення перехідних процесів  $w_1 - w_3$  наведене на рис. 2.10.



a)

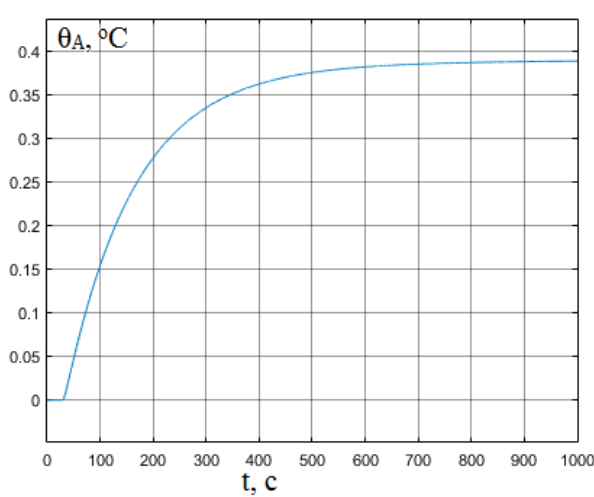
б)



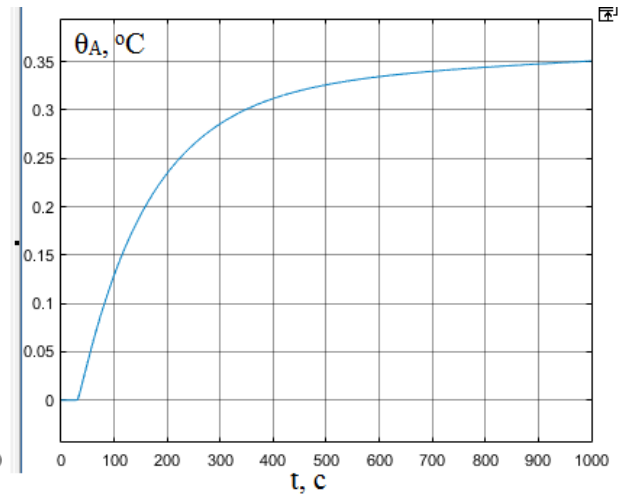
в)

Рис. 2.10 Перехідні процеси  $w_1 - w_3$  а)  $w_1$ ; б)  $w_2$ ; в)  $w_3$ 

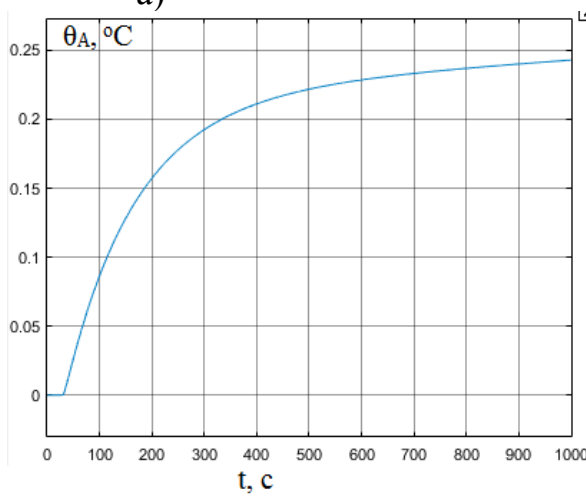
Графічне зображення перехідних процесів  $w_4$  для при різних  $K$  рециркуляції наведене на рис. 2.11.



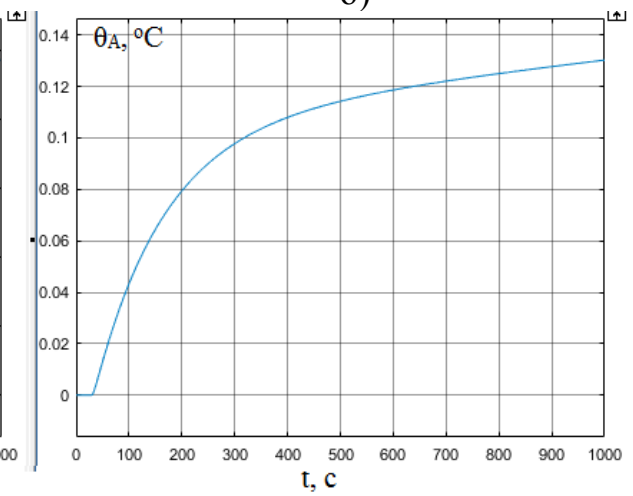
а)



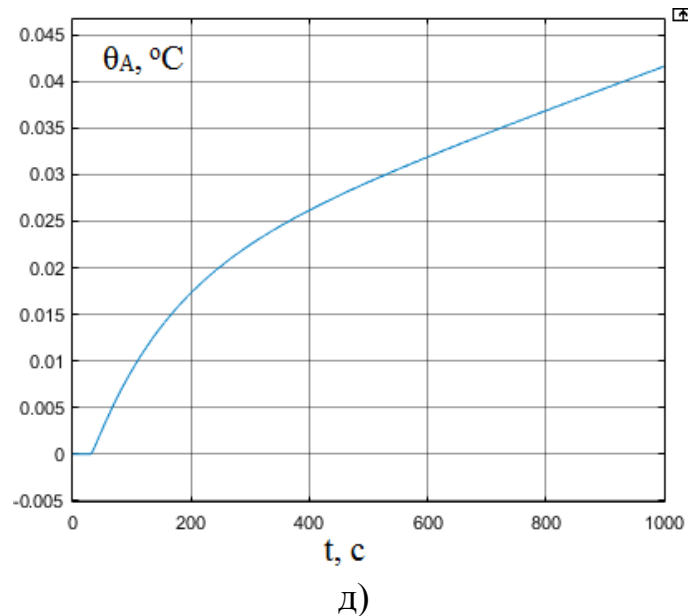
б)



в)



г)

Рис. 2.11 Перехідні процеси  $w_4$ 

а)  $K=0.1$ ; б)  $K=0.25$ ; в)  $K=0.5$ ; г)  $K=0.75$ ; д)  $K=0.95$

## 2.8 Апроксимація перехідних характеристик

Так як передатні функції каналів отримались дуже громісткі, а основні інерційності за каналами мають аперіодичну складову, то для спрощення розрахунків апроксимуємо їх. Також врахуємо інерційності датчика температури та виконавчого механізму у вигляді перехідних характеристик:  $W_T = \frac{1}{12s+1}$  та  $W_{BM} = \frac{1}{30s+1}$  відповідно.

Перехідні характеристики для калорифера і охолоджувача будемо апроксимувати аперіодичною ланкою другого порядку з запізненням. Передатна характеристика має вигляд:

$$W_o = \frac{k_{об}}{T_2 p^2 + T_1 p + 1} e^{-p\tau_o} \quad (2.18)$$

Отримали:

$$W_K = \frac{0.07555}{2376p^2 + 160.5p + 1} e^{-30}$$

$$W_0 = -\frac{0.305}{2376p^2 + 160.5p + 1} e^{-30}$$

Побудуємо перехідні характеристики до та після апроксимації для калорифера та охолоджувача, рис.2.12 та рис. 2.13 відповідно.

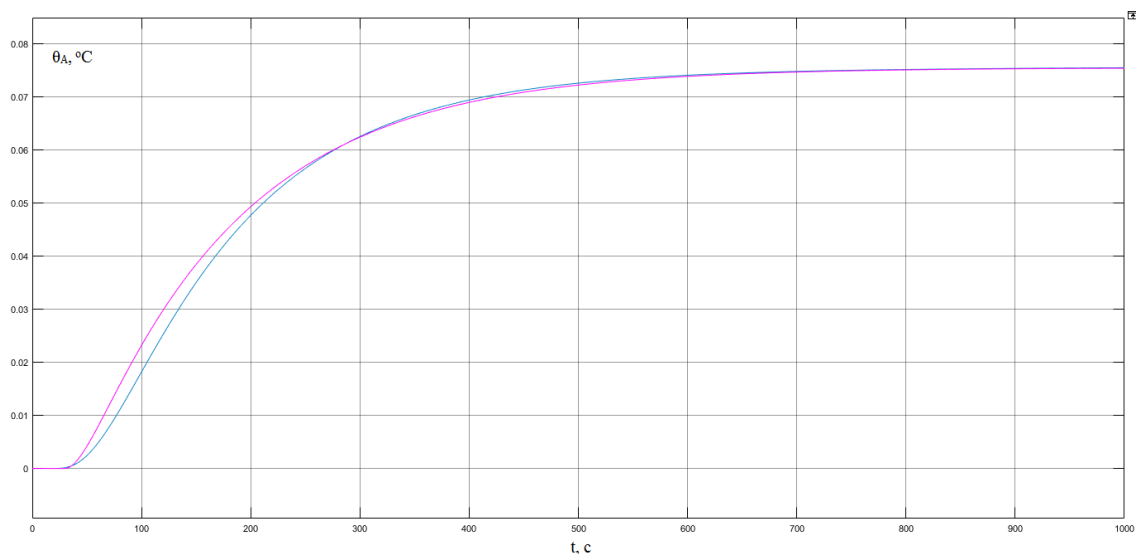


Рис. 2.12 Перехідні процеси калориферу

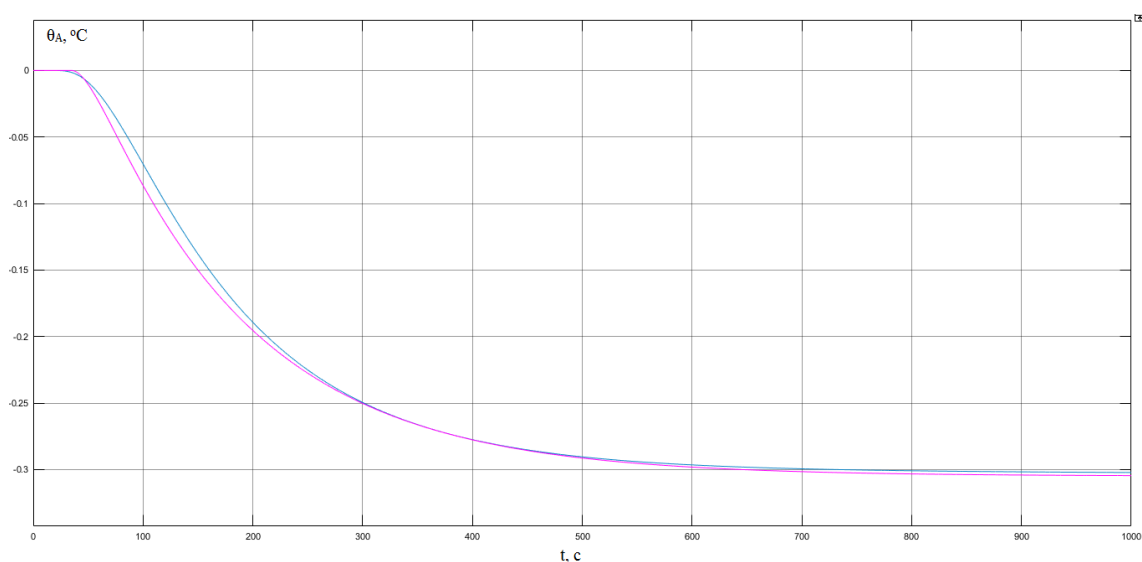


Рис. 2.13 Перехідні процеси охолоджувача

Перехідні характеристики для приміщення з різними коефіцієнтами рециркуляції будемо апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку та ланкою запізнення. Отже, передатна характеристика контуру має вигляд (2.19):

$$W_o = \frac{k_o}{T_o p + 1} e^{-p\tau_o} \quad (2.19)$$

Параметри контуру визначаються модифікованим методом логарифмування. Графічне представлення цього методу наведене на рис. 2.14.

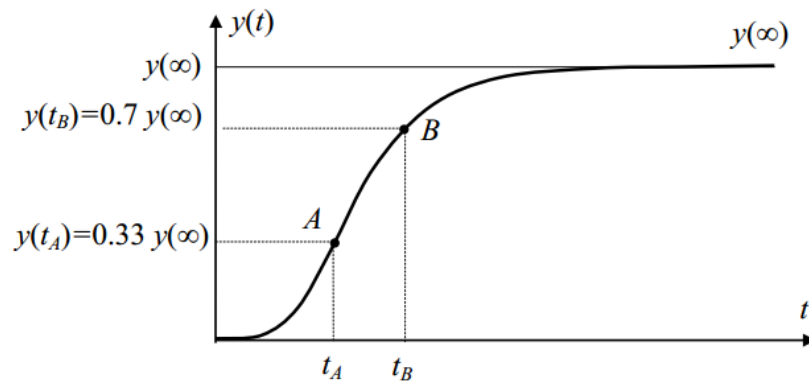


Рис. 2.14 Графічна інтерпретація модифікованого методу логарифмування

Ідея методу полягає у виборі характерних точок –  $A$ ,  $B$  на перехідній характеристиці ОК, які визначають 33% та 70% від усталеного режиму ОК.

Згідно методу, стала часу  $T_o$  та час запізнювання  $\tau_o$  визначаються наступним чином:

$$T_o = 1.25(t_b - t_a), \quad \tau_o = 0.5(3t_a - t_b)$$

Коефіцієнт передачі  $k_o$  визначається як  $y(\infty)$ .

1)  $w_{K=0.1}$

$$\begin{aligned} h(\infty) &= 0,41; 0.7h(\infty) = 0,287; t_b = 221 \text{ c}; 0.33h(\infty) = 0,135, t_a = 102 \text{ c}; \\ T_o &= 1.25(t_b - t_a), \quad \tau_o = 0.5(3t_a - t_b); T_o = 1,25(221 - 102) = 148,75 \text{ c}; \\ \tau_o &= 0,5(3 * 102 - 221) = 42,5 \text{ c}; k_o = 0,41. \end{aligned}$$

$$w_{K=0.1} = \frac{0.41}{148.75p + 1} e^{-42.5p}$$

2)  $w_{K=0.25}$

$$\begin{aligned} h(\infty) &= 0,35; 0.7h(\infty) = 0,245, t_b = 228 \text{ c}; 0.33h(\infty) = 0,115, t_a = 103 \text{ c}; \\ T_o &= 1.25(t_b - t_a), \quad \tau_o = 0.5(3t_a - t_b); T_o = 1,25(228 - 103) = 156,25 \text{ c}; \\ \tau_o &= 0,5(3 * 103 - 228) = 40,5 \text{ c}; k_o = 0,35. \end{aligned}$$

$$w_{K=0.25} = \frac{0.35}{156.25p + 1} e^{-40.5p}$$

3)  $w_{K=0.5}$

$$\begin{aligned} h(\infty) &= 0,248; 0.7h(\infty) = 0,173, t_b = 255 \text{ c}; 0.33h(\infty) = 0,082, t_a = 108 \text{ c}; \\ T_o &= 1.25(t_b - t_a), \quad \tau_o = 0.5(3t_a - t_b); T_o = 1,25(255 - 108) = 183,75 \text{ c}; \\ \tau_o &= 0,5(3 * 108 - 255) = 34,5 \text{ c}; k_o = 0,248. \end{aligned}$$

$$w_{K=0.5} = \frac{0.248}{183,75p + 1} e^{-34.5p}$$

4)  $w_{K=0.75}$

$$h(\infty) = 0,13; 0.7h(\infty) = 0,091, t_b = 307 \text{ c}; 0.33h(\infty) = 0,0429, t_a = 111 \text{ c};$$

$$T_o = 1.25(t_b - t_a), \tau_o = 0.5(3t_a - t_b); T_o = 1,25(307 - 111) = 245 \text{ c};$$

$$\tau_o = 0,5(3 * 111 - 307) = 13 \text{ c}; k_o = 0,13$$

$$w_{K=0.75} = \frac{0.13}{245p + 1} e^{-13p}$$

5)  $w_{K=0.95}$

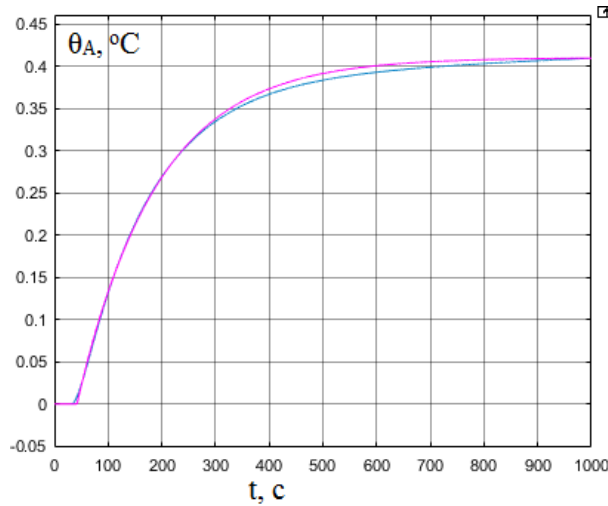
$$h(\infty) = 0,04; 0.7h(\infty) = 0,028, t_b = 476 \text{ c}; 0.33h(\infty) = 0,0132, t_a = 156 \text{ c};$$

$$T_o = 1.25(t_b - t_a), \tau_o = 0.5(3t_a - t_b); T_o = 1,25(476 - 156) = 400 \text{ c};$$

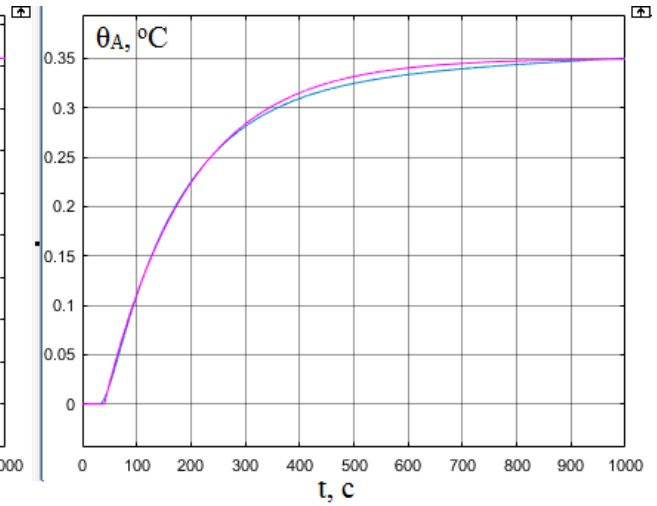
$$\tau_o = 0,5(3 * 156 - 476) = 8 \text{ c}; k_o = 0,04.$$

$$w_{K=0.95} = \frac{0.04}{400p + 1} e^{-8p}$$

Отже, перехідні характеристики  $w_4$  зображені на рис. 2.15 при: а)  $K=0.1$ , б)  $K=0.25$ , в)  $K=0.5$ , г)  $K=0.75$ , д)  $K=0.95$

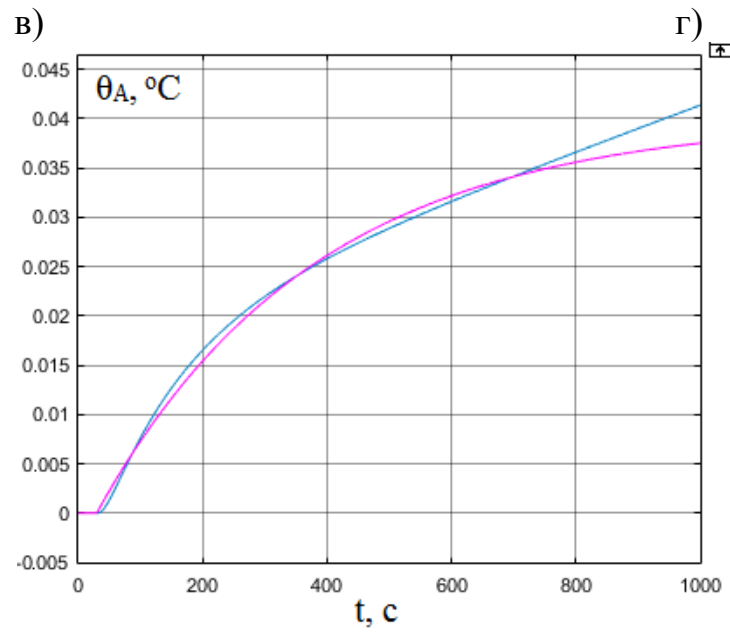
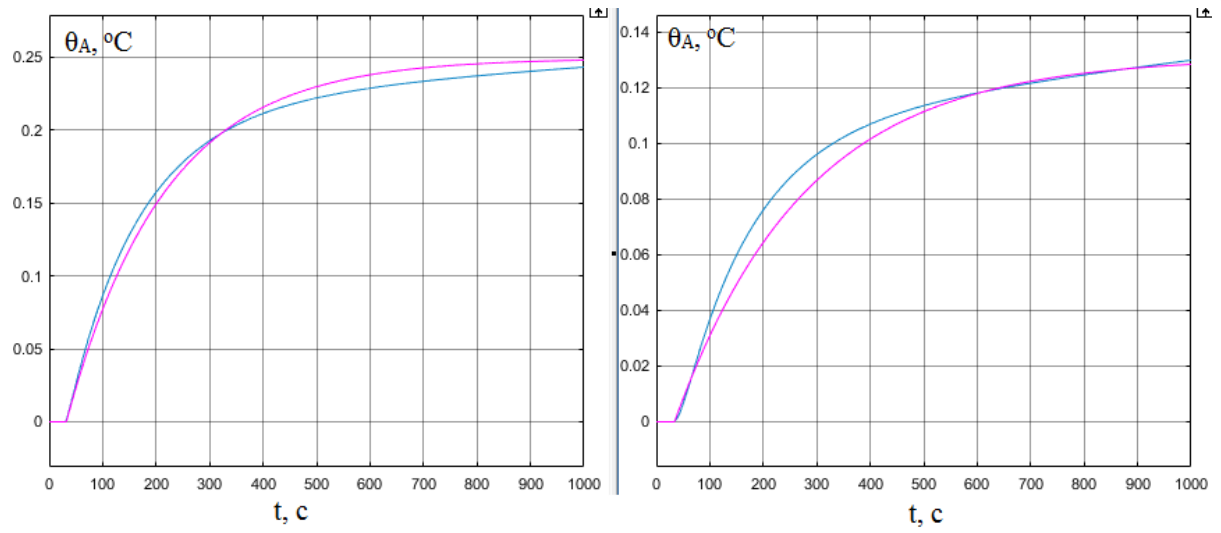


а)



б)





д)

Рис. 2.15 Перехідні характеристики  $w_4$

### 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ПРИПЛИВНО-ВИТЯЖНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ

#### 3.1 Структурна схема АСР

Для аналізу основних керуючих та збурюючих впливів на ПВСВ розглянемо структурну схему, що зображена на рис. 3.1. Основними структурними елементами ПВСВ із рециркуляцією є: калорифер К; охолоджувач О; приміщення П; камера рециркуляції КР; повітропровід ПП [1].

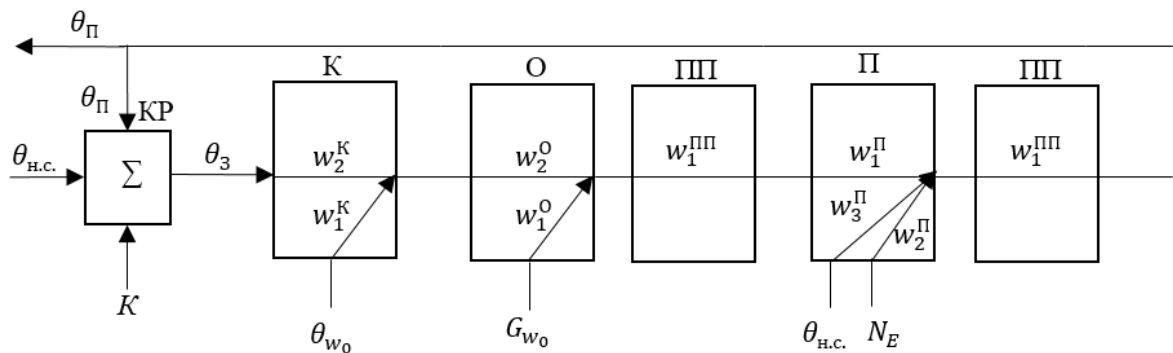


Рис. 3.1 Структурна схема ПВСВ із рециркуляцією

Структурна схема автоматичної системи керування (АСК) представлена на рис. 3.2. Датчик Д контролює температуру повітря в приміщенні у. Завдання регулятора  $y_3$  порівнюється із регульованою величиною у, а розбаланс надходить на регулятор Р. Регулятор формує керуючий вплив, який через комутатор SP передається на виконавчий механізм калорифера або охолоджувача (BM1 або BM2).

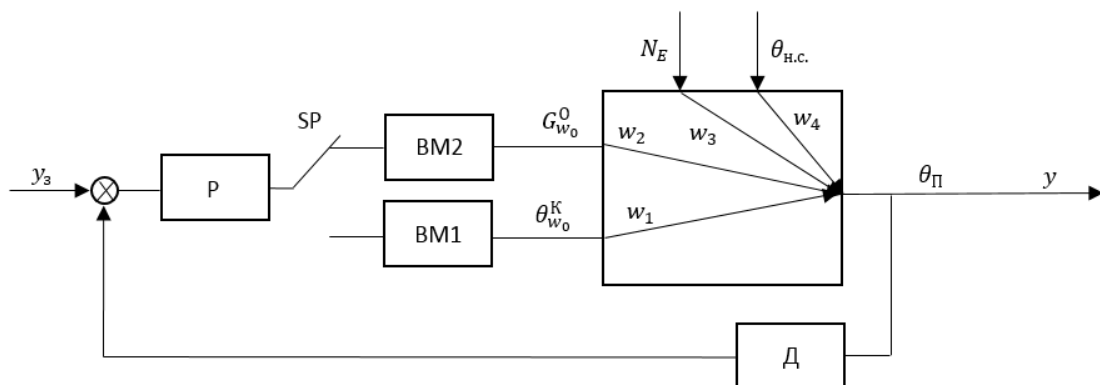


Рис. 3.2 Структурна схема АСК ПВСВ із рециркуляцією

Робота комутатора SP організовується автоматично. Якщо температура навколишнього середовища  $\theta_{н.с.} < y_3$  регулятор Р через ВМ1 впливає на зміну теплової потужності калорифера, інакше – ВМ2 впливає на потужність охолоджувача, зменшуючи температуру припливного повітря.

В загальному випадку динамічні властивості каналів  $W_1$  та  $W_2$  різні, а динамічні властивості каналу  $W_4$  змінюються від коефіцієнту рециркуляції. З цих міркувань, налаштування параметрів регулятора Р необхідно адаптувати до каналів впливу  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_4$ . Іншими словами, АСК повинна мати адаптивні налаштування регулятора Р в залежності від пори року та ступеню рециркуляції  $K$  ПВСВ.

### 3.2 Вибір методу налагодження АСР

Для доброго функціонування АСК повинна забезпечувати необхідну якість регулювання, досягати необхідних температурних параметрів у приміщенні, а також забезпечувати необхідні показники ефективності обладнання.

Для адаптивного налаштування АСК ПВСВ використаємо метод за інтегральними показниками якості із мінімізацією керуючого впливу.

Модульний критерій якості є ефективним для синтезу ПІ та ПІД регуляторів із урахуванням неідеальності диференційної складової закону керування. Алгоритм оптимізації відкриває можливість синтезу цифрового регулятора без етапу апроксимації динамічних властивостей ОК, що дозволяє зменшити похибку моделювання АСК за рахунок виключення етапу апроксимації. Важливу роль для синтезу оптимальної САК відіграє коректний вибір каналу впливу, що визначається вимогами технологічного процесу [6].

Розглянемо одноконтурну АСР, що складається з ОК, регулятора та суматора,  $uz(t)$  – сигнал завдання,  $e(t)$  – помилка регулювання,  $u(t)$  – сигнал керування,  $y(t)$  – вихідний сигнал ОК. Структурна схема представлена на рис. 3.3.

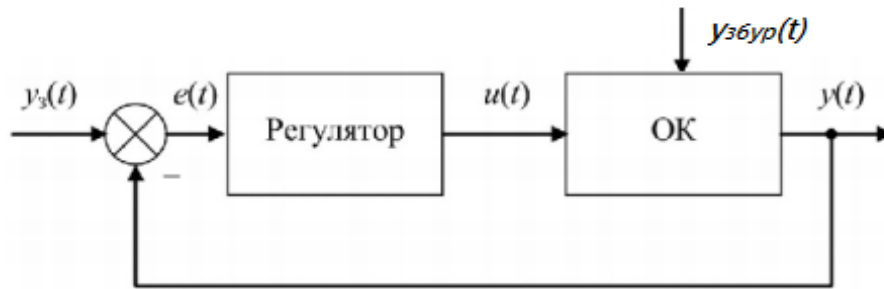


Рис. 3.3 Структурна схема АСР

Інтегральна форма для оптимізації АСК має вигляд:

$$I = \int_0^f |e| dt, \quad (3.1)$$

Критерій адаптований до задач динамічної оптимізації САК технологічних процесів, де коректно враховується сигнал керування  $u(t)$ . Квадратичний критерій якості має аналітичний розв'язок, тому його часто використовують. Модульний критерій якості базується на чисельному методі розв'язку. Квадратичний критерій якості схильний до коливань перехідного процесу порівняно з модульним, тому для системи керування ПВСВ було обрано модульний критерій якості. Алгоритм синтезу цифрової АСК може базуватися на будь-якому чисельному методі пошуку локального мінімуму. Використання модульного критерію якості дає змогу оцінити динамічні властивості АСК для налагодження системи керування, що буде задовольняти вимогам технологічного процесу. Для оптимальних налаштувань регуляторів використовувалась програма `optcompv` [5].

### 3.3 Розрахунок АСР для зимового режиму роботи системи

В пункті 2.8 було отримано апроксимовані передатні функції для водяного калориферу, охолоджувачу та приміщення з врахуванням інерційності датчика температури та виконавчого механізму. Використаємо їх для розрахунку АСР ПВСВ. Особливістю теплообмінних апаратів є мала інерційність каналів збурення у порівнянні із каналами регулювання, що пояснюється теплопередачею через металеві теплообмінні трубки, які повинні прогріватися.

Як вже вказувалось вище, головним каналом впливу є зміна температури повітря, менш впливовими будуть тепловиділення від людей і пристроїв в приміщенні та зміна температури повітря на вулиці.

Згідно з пунктом 3.1, передаточна функція в режимі на нагрів, буде:

$$W = \frac{W_4}{1 + W_1 W_{\text{рег}}}, \quad (3.2)$$

де  $W_1$  – передатня функція водяного калориферу,  $W_4$  – передатня функція приміщення  $W_{\text{рег}}$  – передатня функція регулятора.

Для розрахунків регуляторів було розглянуто програмний метод налаштування регуляторів АСК ПБСВ за допомогою програми [5] із використанням модульного критерію якості.

Розрахуємо параметри налаштування регулятора системи керування в режимі на нагрів для передаточної функції (3.1) за допомогою програми optcompv. Оптимальні налаштування регуляторів показано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Оптимальні налаштування регуляторів в режимі на нагрів

Режим	Нагрів	Нагрів	Нагрів	Нагрів	Нагрів
$K_{\text{рец}}$	0.1	0.25	50	0.75	0.95
$K_p$	39.5	39.35	40.3	41.8	44.35
$T_i$	131.1	128.2	122.3	111.7	101.9

За отриманими параметрами побудуємо в Matlab Simulink структурну схему. Перехідні характеристики системи при  $K_{\text{рец}}=0.1-0.95$  показані на рис. 3.4 – 3.8. Порівняльна таблиця прямих показників якості показана в таблиці 3.2.

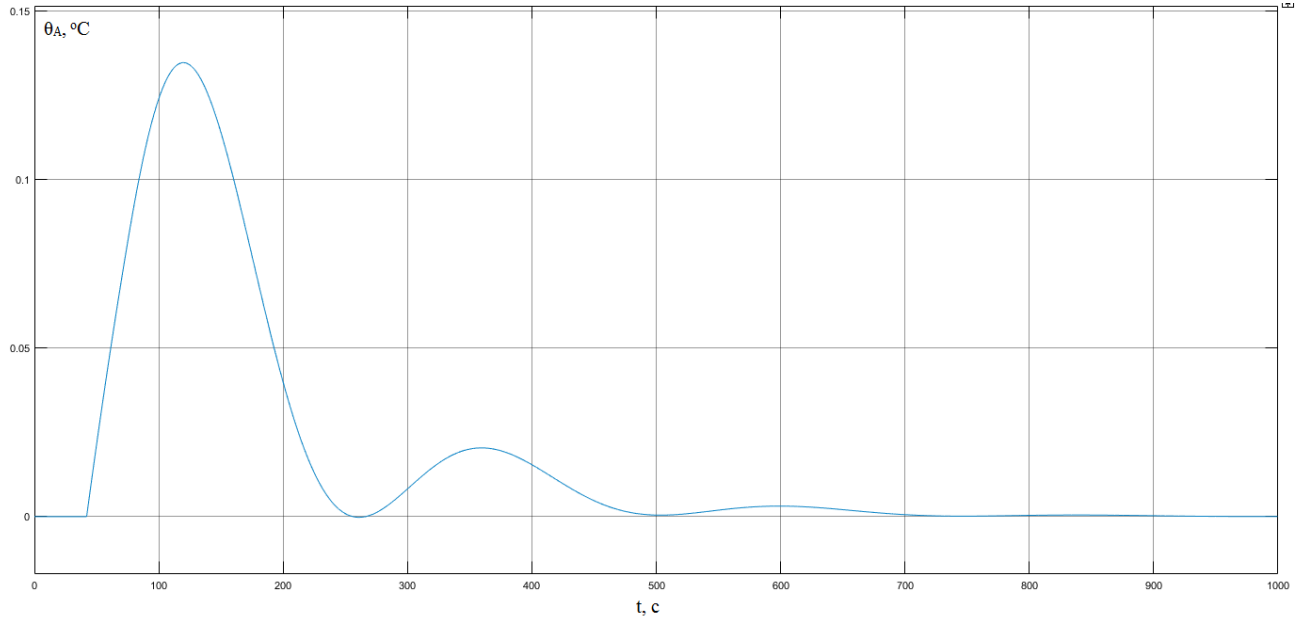


Рис. 3.4 Перехідна характеристика системи в режимі нагрів при  $K_{\text{rec}}=0.1$

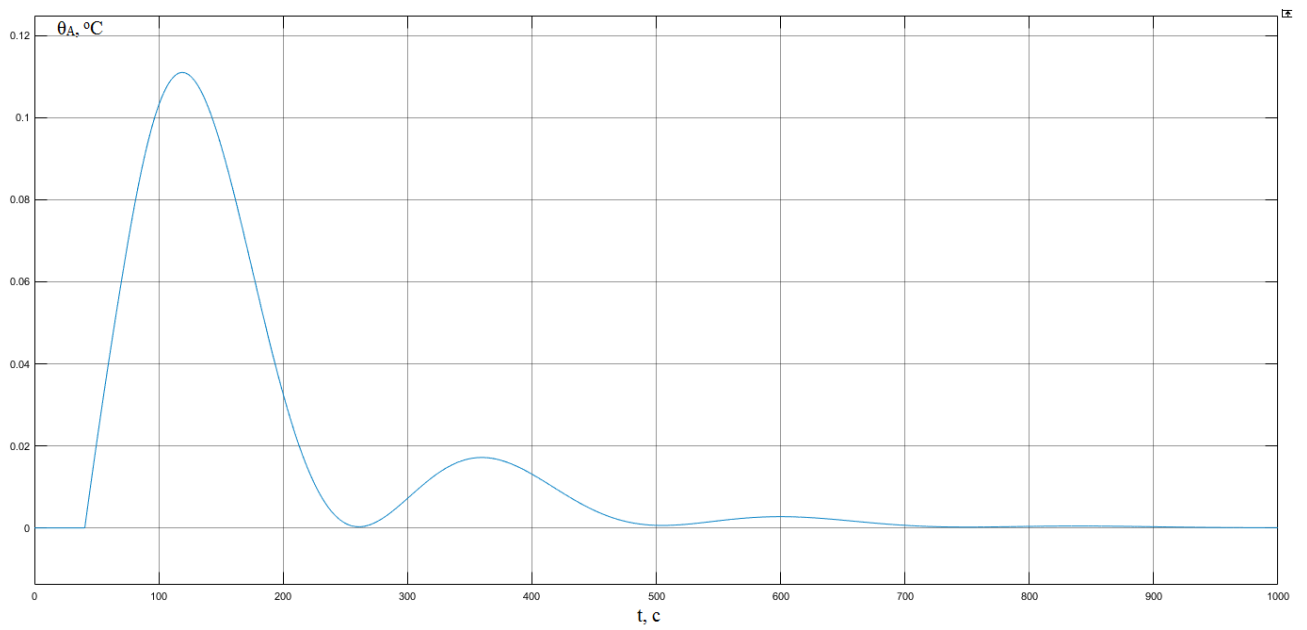


Рис. 3.5 Перехідна характеристика системи в режимі нагрів при  $K_{\text{rec}}=0.25$

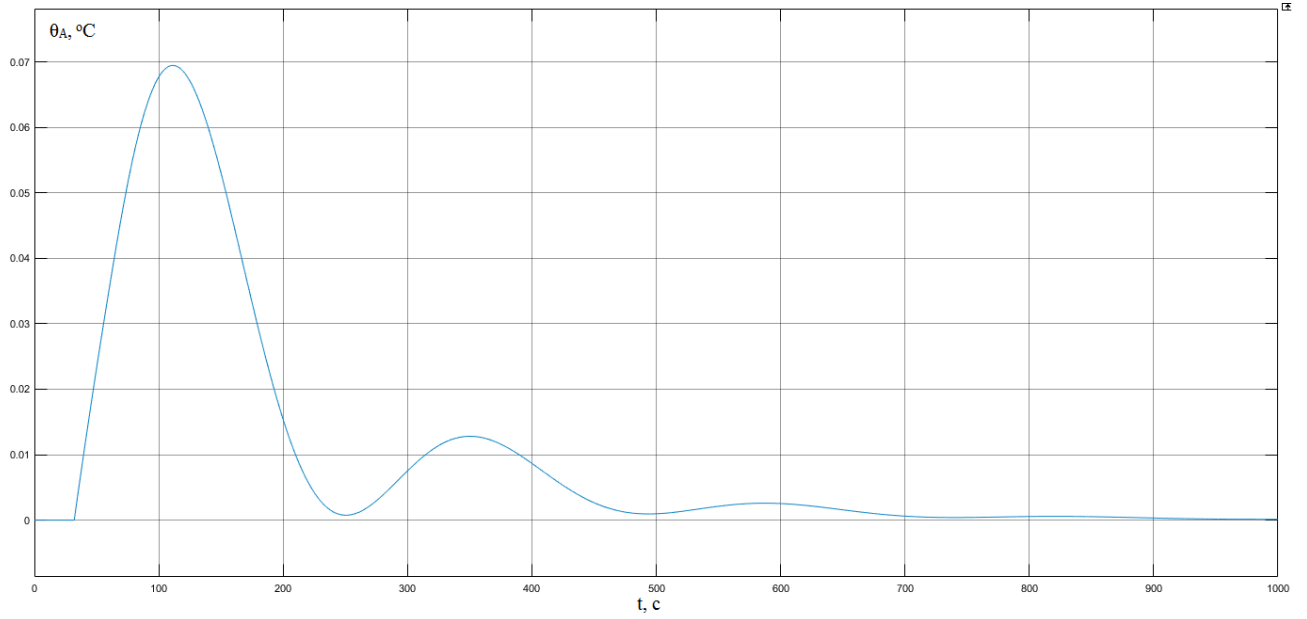


Рис. 3.6 Перехідна характеристика системи в режимі нагрів при  $K_{\text{рез}}=0.5$

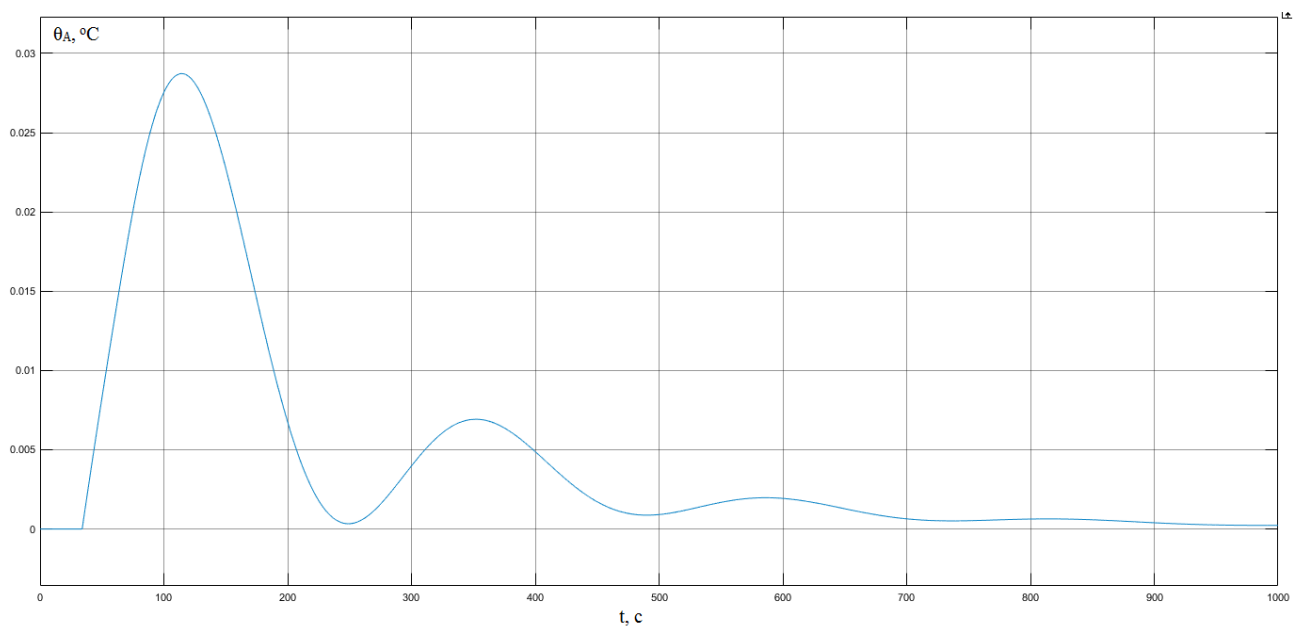


Рис. 3.7 Перехідна характеристика системи в режимі нагрів при  $K_{\text{рез}}=0.75$

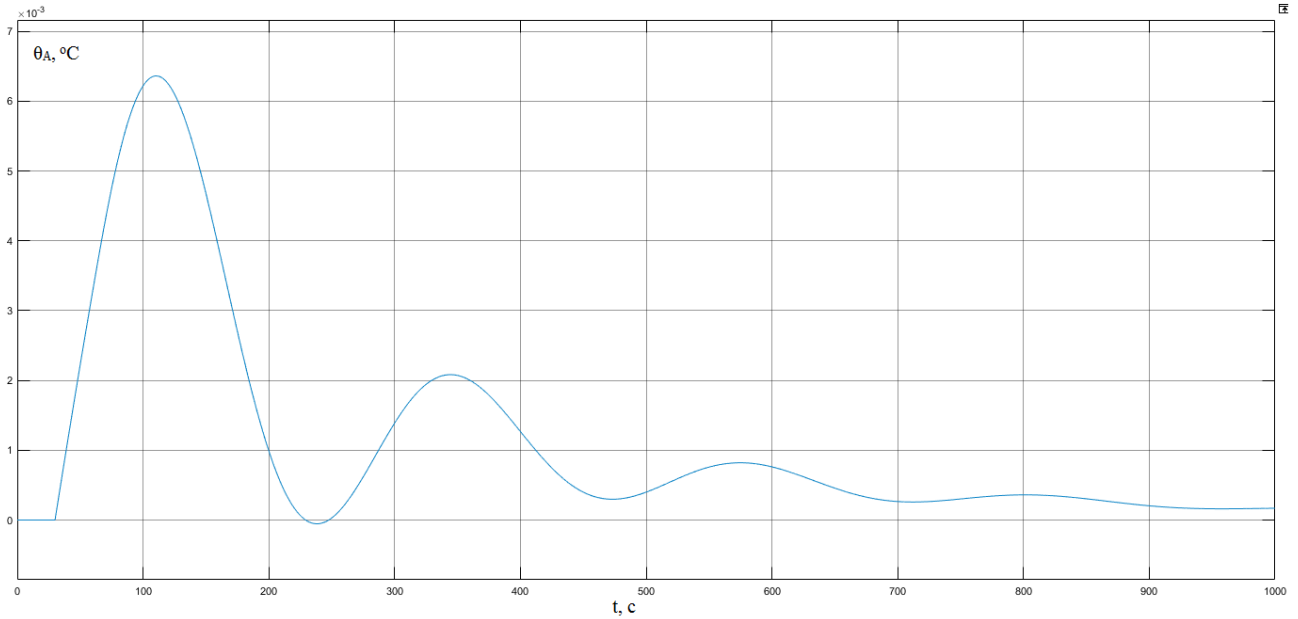


Рис. 3.8 Перехідна характеристика системи в режимі нагрів при  $K_{\text{рец}}=0.95$

Таблиця 3.2 Прямі показники якості в режимі нагрів

Режим	Нагрів	Нагрів	Нагрів	Нагрів	Нагрів
$K_{\text{рец}}$	0.1	0.25	50	0.75	0.95
Статична похибка	0	0	0	0	0
Динамічна похибка	0.134	0.111	0.0695	0.028	0.0064
Час регулювання	437	437	442	640	845
Перерегулювання	84	85	81	76	67

### 3.4 Розрахунок АСР для літнього режиму роботи системи

Таким чином, згідно пункту 3.1 передаточна функція в режимі на охолодження має вигляд:

$$W = \frac{W_4}{1 + W_2 W_{\text{рег}}}, \quad (3.3)$$

де  $W_2$  – передатня функція водяного охолоджувача,  $W_4$  – передатня функція приміщення  $W_{\text{рег}}$  – передатня функція регулятора.

Аналогічно розрахуємо параметри налаштування регулятора системи керування в режимі на охолодження для передаточної функції (3.2) за допомогою програми optcompv [5]. Оптимальні налаштування регуляторів наведені в таблиці 3.3. Порівняльна таблиця прямих показників якості показана в таблиці 3.4.



Таблиця 3.3 Оптимальні налаштування регуляторів на охолодження

Режим	Охолодж.	Охолодж.	Охолодж.	Охолодж.	Охолодж.
$K_{\text{рец}}$	0.1	0.25	50	0.75	0.95
$K_p$	-9.95	-9.1	-9.3	-9.3	9.9
$T_i$	136.6	135.9	129.1	113.2	105.3

За отриманими параметрами побудуємо в Matlab Simulink структурну схему. Перехідні характеристики системи при  $K_{\text{рец}}=0.1-0.95$  показані на рис. 3.9 – 3.13.

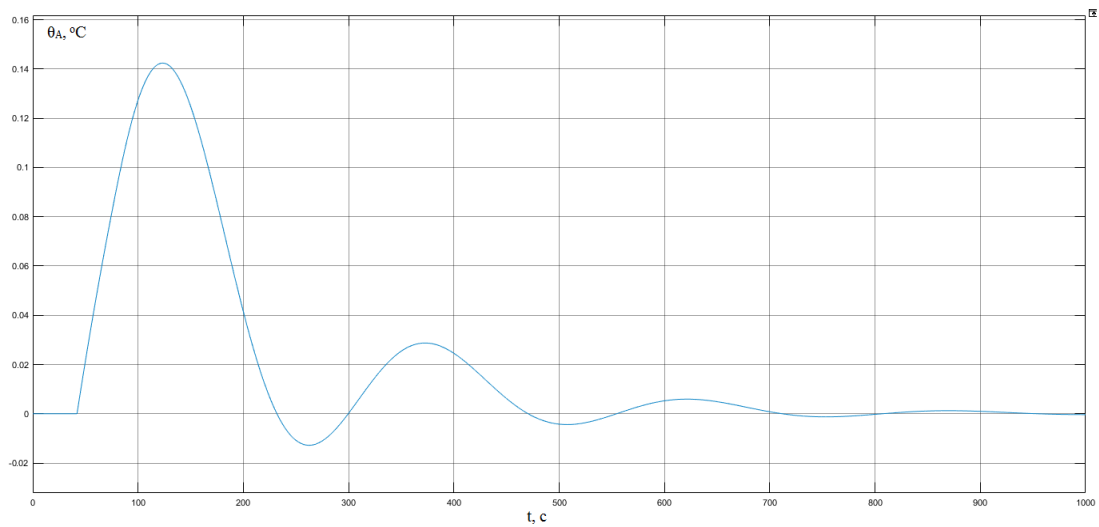


Рис. 3.9 Перехідна характеристика системи в режимі на охолодження при  $K_{\text{рец}}=0.1$

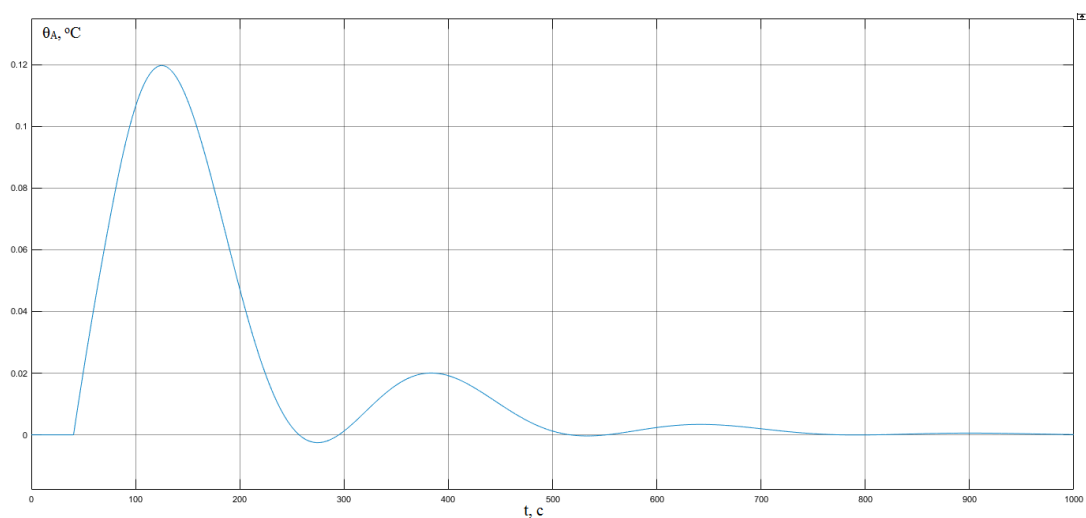


Рис. 3.10 Перехідна характеристика системи в режимі на охолодження при  $K_{\text{рец}}=0.25$

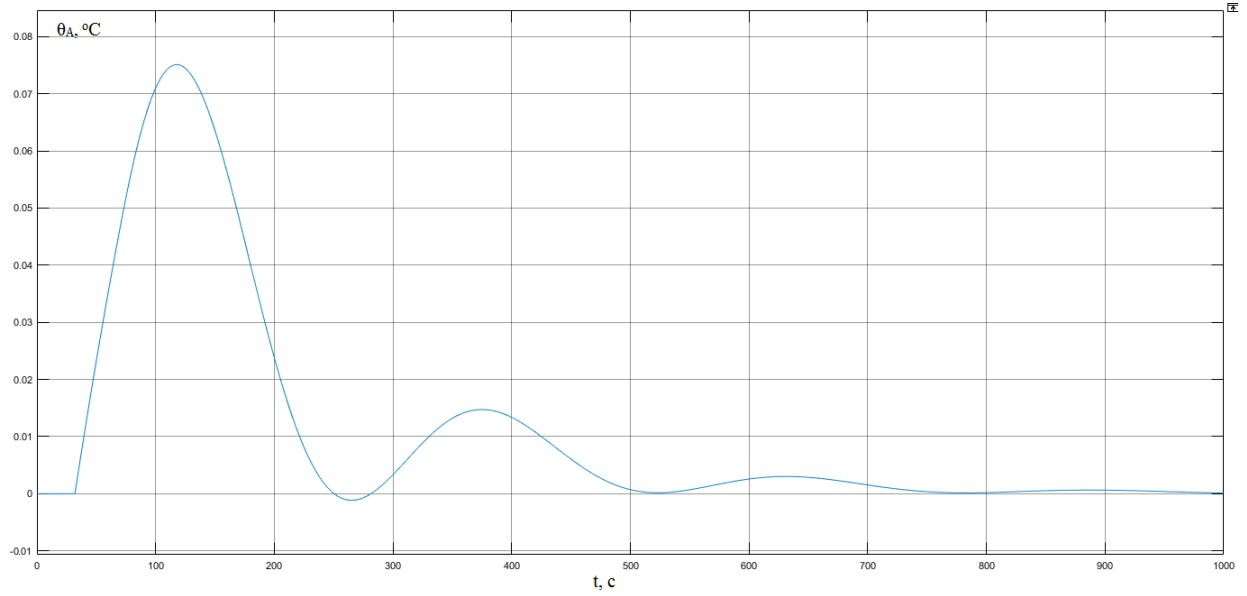


Рис. 3.11 Перехідна характеристика системи в режимі на охолодження при  $K_{\text{рез}}=0.5$

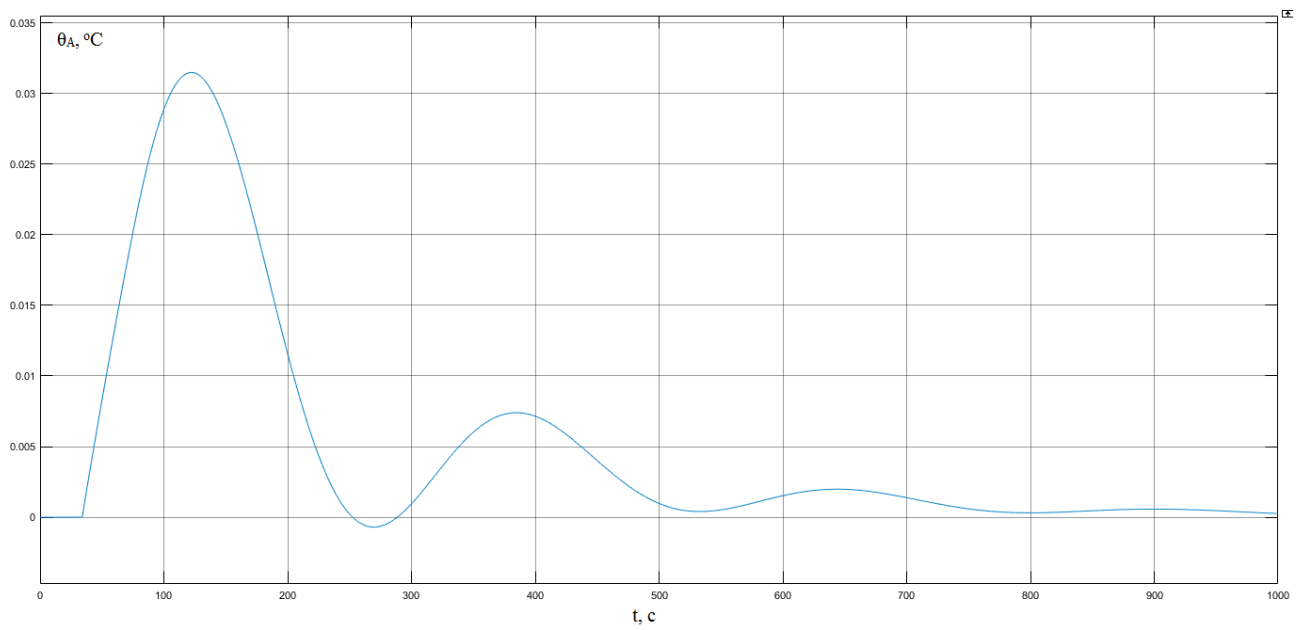


Рис. 3.12 Перехідна характеристика системи в режимі на охолодження при  $K_{\text{рез}}=0.75$

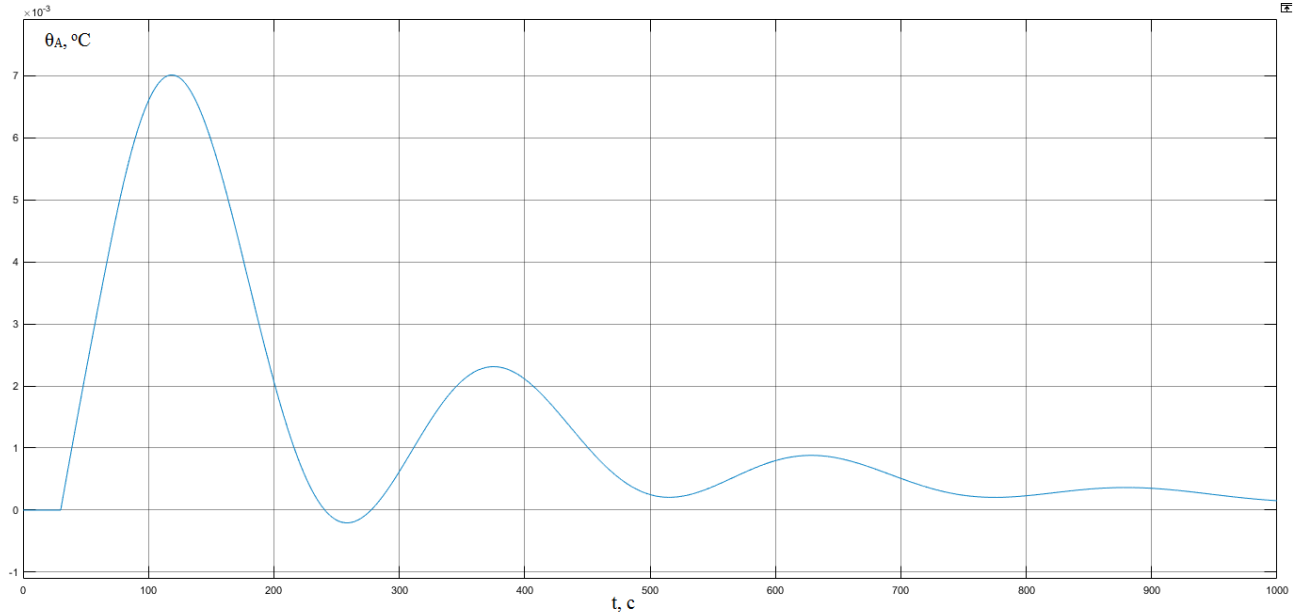


Рис. 3.13 Перехідна характеристика системи в режимі на охолодження при  $K_{\text{рец}}=0.95$

Таблиця 3.4 Прямі показники якості в режимі на охолодження

Режим	Охолодж.	Охолодж.	Охолодж.	Охолодж.	Охолодж.
$K_{\text{рец}}$	0.1	0.25	0.5	75	0.95
Статична похибка	0	0	0	0	0
Динамічна похибка	0.14	0.12	0.075	0.0315	0.007
Час регулювання	448	463	468	691	901
Перерегулювання	79	83	80	77	67

### 3.5 Інтерполяція розрахункових даних для адаптивного регулятора

Отримані налаштування регуляторів в режимі на нагрів та на охолодження було інтерпольовано та отримано лінійні залежності  $K_p$  і  $T_i$  від положення заслінки рециркуляції.

В режимі на нагрів отримали такі залежності:

$$K_p = 0.0009K_{\text{рец}}^2 - 0.0379K_{\text{рец}} + 39.79$$

$$T_i = -0.0026K_{\text{рец}}^2 - 0.0728K_{\text{рец}} + 131.96$$

Графіки залежностей представлені на рис. 3.14 та 3.15.

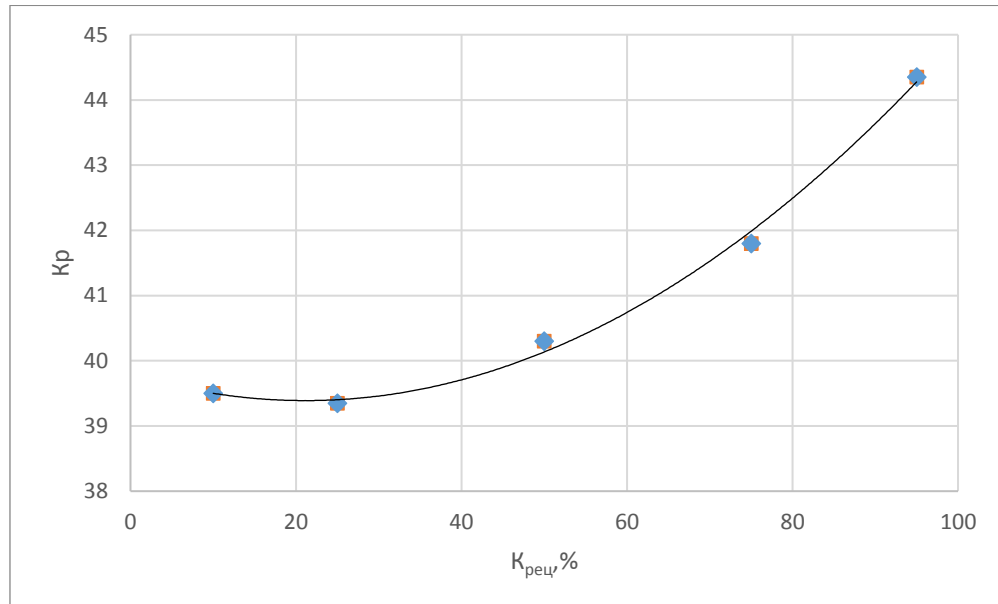


Рис. 3.14 Залежність  $K_p$  від  $K_{рец}$  в режимі нагрів

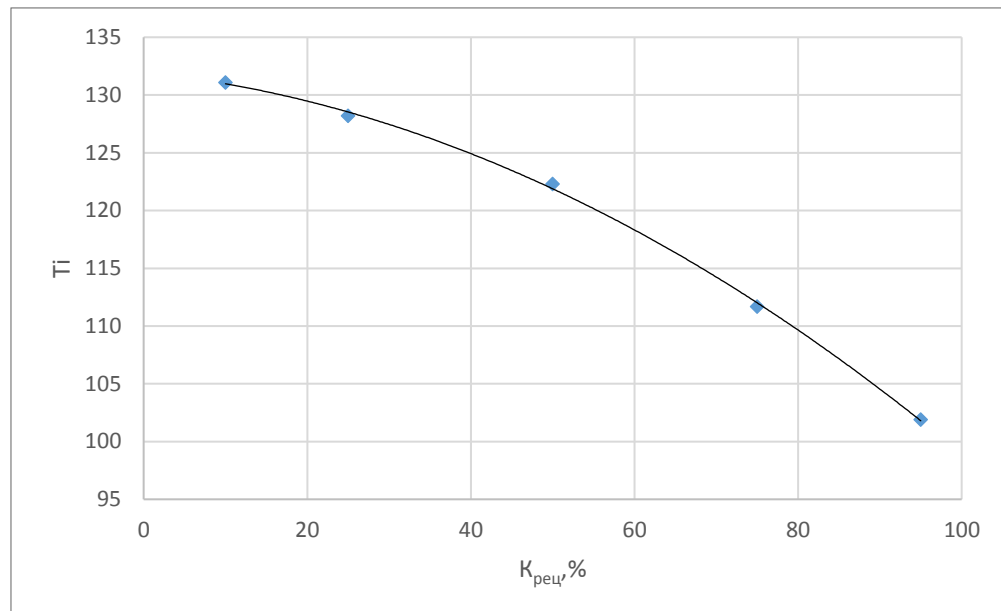


Рис. 3.15 Залежність  $T_i$  від  $K_{рец}$  в режимі нагрів

В режимі на охолодження отримали такі залежності:

$$K_p = -0.005K_{рец}^2 + 0.0503K_{рец} + 10.303$$

$$T_i = -0.0032K_{рец}^2 - 0.0542K_{рец} + 138.36$$

Графіки залежностей представлені на рис. 3.16 та 3.17.

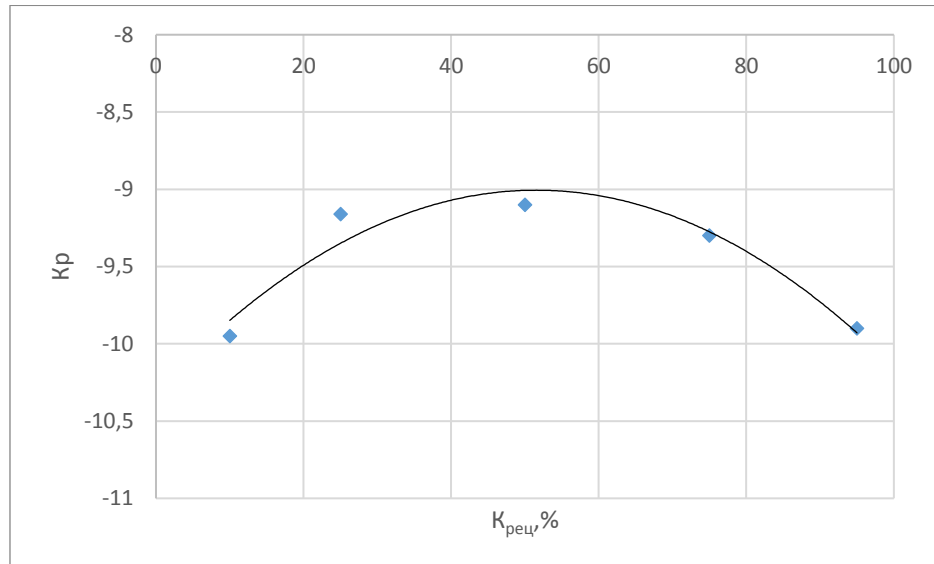


Рис. 3.16 Залежність  $K_p$  від  $K_{\text{рец}}$  в режимі на охолодження

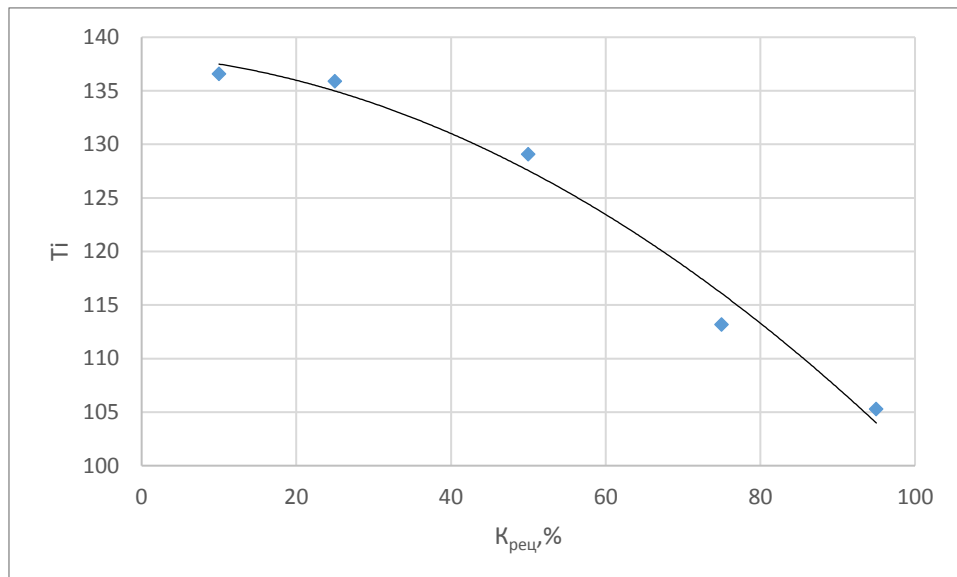


Рис. 3.17 Залежність  $T_i$  від  $K_{\text{рец}}$  в режимі на охолодження

Використаємо оптимальні налаштування при  $K_{\text{рец}}=0.5$  для всіх об'єктів керування на нагрів і охолодження. Перехідні характеристики на нагрів і охолодження при  $K_{\text{рец}}=0.1-0.95$  показано на рис. 3.18 та 3.19 відповідно.

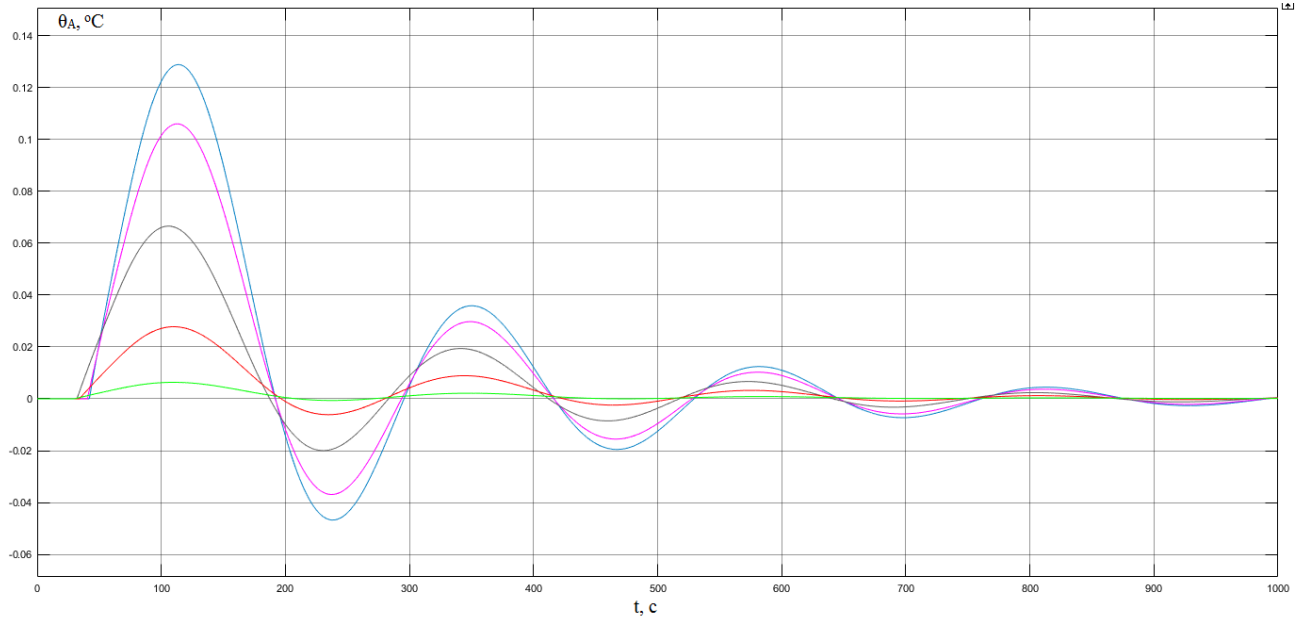


Рис. 3.18 Перехідні характеристики при  $K_{\text{рез}}=0.1-0.95$  в режимі нагрів

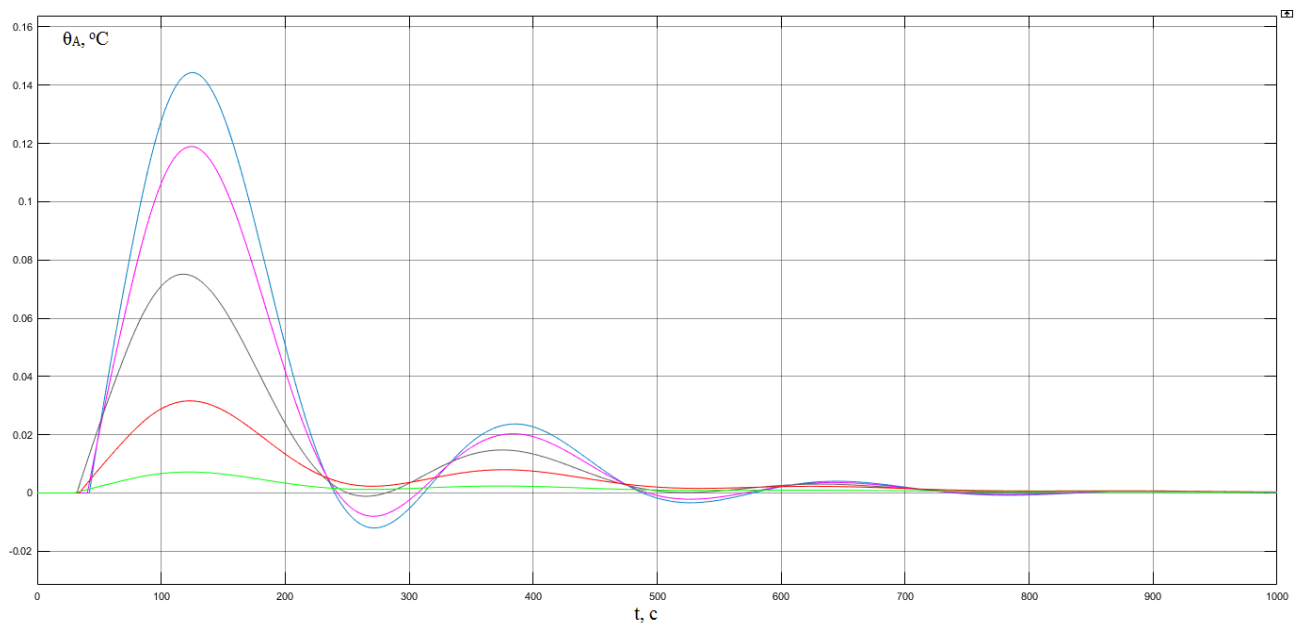


Рис. 3.19 Перехідні характеристики при  $K_{\text{рез}}=0.1-0.95$  в режимі на охолодження

Як бачимо, з рис. 3.18 та 3.19 при використанні не оптимальних налаштувань регуляторів збільшується динамічна похибка та час перехідних процесів. Це може негативно вплинути на досягнення необхідних температурних параметрів у приміщенні та не зможе забезпечувати необхідні показники ефективності обладнання.

## 4 ОСНОВНІ РІШЕННЯ З АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ

### 4.1 Технічні рішення з контролю та регулювання системи вентиляції

Для того, щоб система вентиляції могла працювати в належному стані, вона повинна отримувати своєчасну і достовірну інформацію про стан об'єкту від контрольно-вимірювальних приладів. Дані прилади дозволяють здійснювати контроль та вимірювання необхідних технічних параметрів, відхилення від номінальних значень яких будуть свідчити про порушення нормального функціонування системи.

Щоб забезпечити надійність роботи системи вентиляції було прийнято рішення контролювати наступні параметри:

- Різницевий датчик тиску припливного вентилятору (поз. 5а);
- Різницевий датчик тиску витяжного вентилятору (поз. 7а);
- Реле перепаду тиску припливного фільтру (поз. 6а);
- Реле перепаду тиску витяжного фільтру (поз. 8а);
- Захисний термостат водяного калорифера (поз. 17а).

Також, для інформації про загальний стан роботи системи вентиляції контролю підлягають наступні параметри:

- Температура припливного повітря (поз. 1а);
- Температура зворотної води калорифера (поз. 2а);
- Температура зовнішнього повітря (поз. 3а);
- Температура повітря в приміщенні (поз. 4а);

Для системи вентиляції важливими параметрами є температури повітря, тому вони повинні вимірюватись з високою точністю. Для температури припливного повітря, зовнішнього повітря та температури повітря в приміщенні застосовується каналний датчик температури TES-A11 Pt100 (поз. 1а, 3а, 4а). Для вимірювання температури зворотної води калориферу потрібно використовувати накладний датчик температури TES-W11 Pt100 (поз. 2а). Діапазон вимірювань для обох типів датчиків  $-40...+90^{\circ}\text{C}$ . Сигнал з датчиків надходить на аналогові входи контролеру AI1-AI4.

В якості захисного термостату для водяного калориферу використовуємо реле температури з регульованою зоною диференціалу типу КР Danfoss KP61 (поз. 17а). Реле використовується для регулювання контролю і аварійної сигналізації в промисловості. Реле типу КР використовують для регулювання температури, а також застосовуються як пристрої захисту. Використовуються в вентиляції як запобіжні пристрої захисту від замерзання. Температура спрацювання -  $30...+15^{\circ}\text{C}$ . Сигнал надходить на дискретний вхід контролеру DI1.

Для сигналізації про засміченість фільтрів припливного та витяжного повітря використовуємо реле перепаду тиску SENTERA PSW-200-PVC (поз. 6а, 8а). Діапазон виміру тиску  $20...200$  Па. Сигнал з реле надходить на дискретний вхід контролеру DI7.

В якості пресостатів вентиляторів припливного та витяжного повітря використовуємо реле перепаду тиску SENTERA PSW-500-PVC (поз. 5а, 7а). Діапазон виміру тиску  $50...500$  Па. Сигнал з реле надходить на дискретний вхід контролеру DI3, DI4.

Дані реле призначені для контролю перепаду тиску на фільтрах та контролю стану приводних ременів вентиляторів, або просто роботи мотора. Основна функція реле – дискретне управління аварійною сигналізацією при виникненні нештатних ситуацій: засмічення фільтра; обрив приводного ремня; зупинка приводу вентилятора; зміна повітряного потоку в повітроводах і так далі.

Для перетворення керуючих сигналів, які формує контролер, у керуючий вплив використовується виконавча апаратура. У якості виконавчої апаратури виступає перетворювач частоти Siemens Sinamics V20. За його допомогою відбувається зміна частоти обертання електроприводу припливного та витяжного вентилятора.

#### **4.2 Реалізація програмного керування системою вентиляції на контролері Schneider Electric Modicon M172**

Для проектування автоматизованої системи керування припливно-витяжною системою вентиляції із рециркуляцією було обрано контролер Schneider Electric Modicon M172. За технічними характеристиками дана модель



забезпечить надійне функціонування, швидке та точне виконання всіх запитів до системи. При цьому вартість даного контролера, ніж вартість контролерів іменитих конкурентів, наприклад Siemens. Також вартість ліценції для програмного забезпечення Siemens є більшою у порівнянні такою ліцензією Schneider Electric.

Даний контролер є модульним та призначений для автоматизації систем вентиляції та кондиціонування повітря. Контролер програмується за допомогою середовища програмування Schneider Electric EcoStruxure™ Machine Expert - HVAC. Програмування може відбуватись за допомогою мови програмування FBD або ST.

До переваг контролера можна віднести наявність симулятора, що дозволяє розробляти програмне забезпечення без необхідності знаходитись поруч з контролером.

При програмуванні було розроблено наступні функціональні блоки, що були інтегровані в бібліотеки: блок обробки аварій; блок обробки показань датчиків; блок керування регуляторами; блок режимів роботи установки; блок керування установкою за розкладом та блок пристроїв, які використовуються. Для блоку пристроїв були розроблені функціональні блоки, а саме: блок заслінок, блок рециркуляції, блок водяного нагрівача, блок водяного охолоджувача, блок вентиляторів.

Блок обробки аварій аналізує аварійні ситуації та у разі їх виникнення відображає у вікні аварій. Аварії поділяються на критичні та небезпечні. При появі критичної аварії – система зупиняється. Всі аварії заводяться в функціональний блок Alarming, що зображений на рис. 4.1. В залежності від того чи це критична чи небезпечна аварія програмуються світлодіодні індикатори на контролері: критична – червоний, небезпечна – жовтий. Реалізація скидання аварій зображено на рис. 4.2. Для небезпечних аварій використовується ручне скидання аварій, а для критичних – автоматичне. Автоматичне скидання аварій зображено на рис. 4.3, ручне скидання аварій зображено на рис. 4.4.

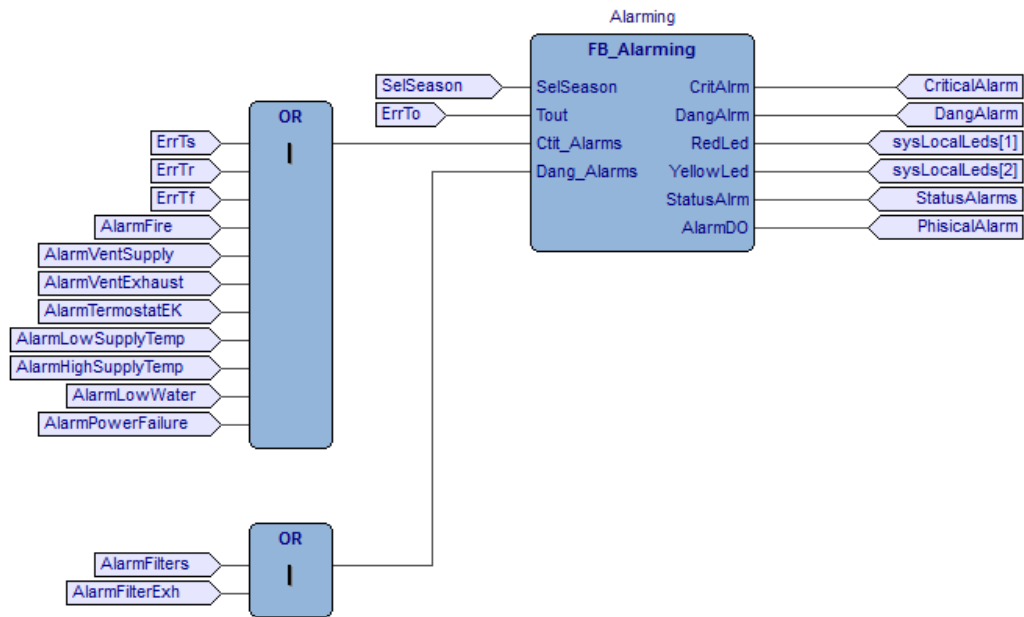


Рис. 4.1 Блок обробки аварій

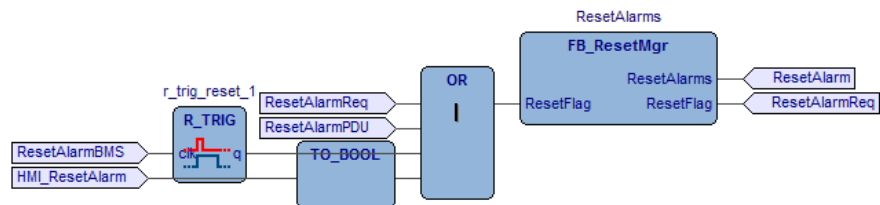
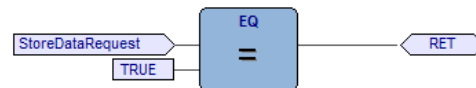


Рис. 4.2 Скидання аварій

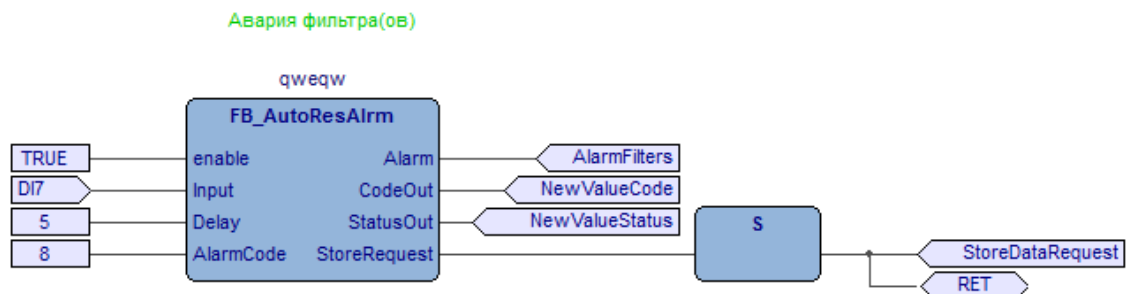


Рис. 4.3 Автоматичне скидання аварій

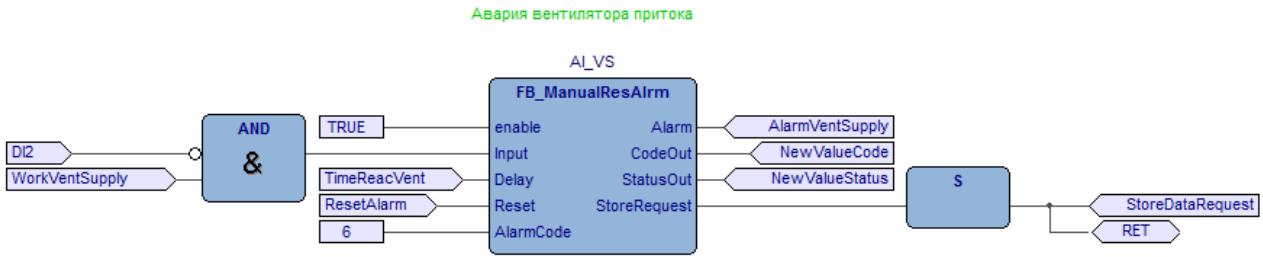


Рис. 4.4 Ручне скидання аварій

Блок Sensors зображено на рис. 4.5. Блок зчитує значення з аналогових входів, перетворює їх у відповідну величину з можливістю коригування статичної похибки.

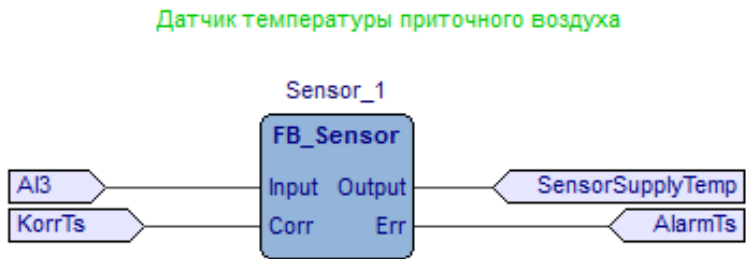


Рис. 4.5 Функціональний блок Sensors

Блок Brain складається 2 функціональних блоків: Proc, зображено на рис. 4.6, відповідає за дозвіл на роботу пристроїв та Seq зображено на рис. 4.7 – керує регуляторами відповідних пристроїв.

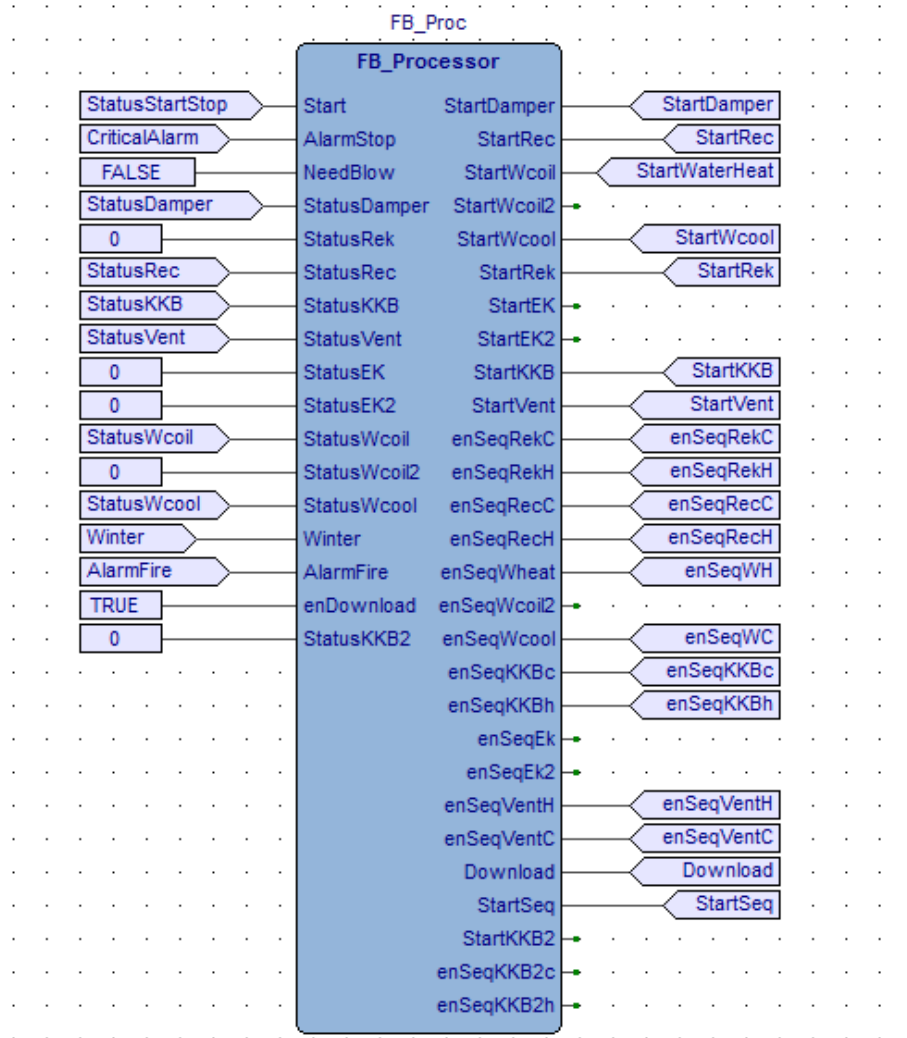


Рис. 4.6 Функціональний блок Proc

В даній програмі використовується блок послідовного включення регуляторів відповідних пристроїв в систему. Даний блок розрахований на 3 пристрої нагріву та 3 пристрої охолодження. Регулятори пристроїв вмикаються якщо виконані всі умови для його включення (прогрів, жалюзі, пора року, тощо).

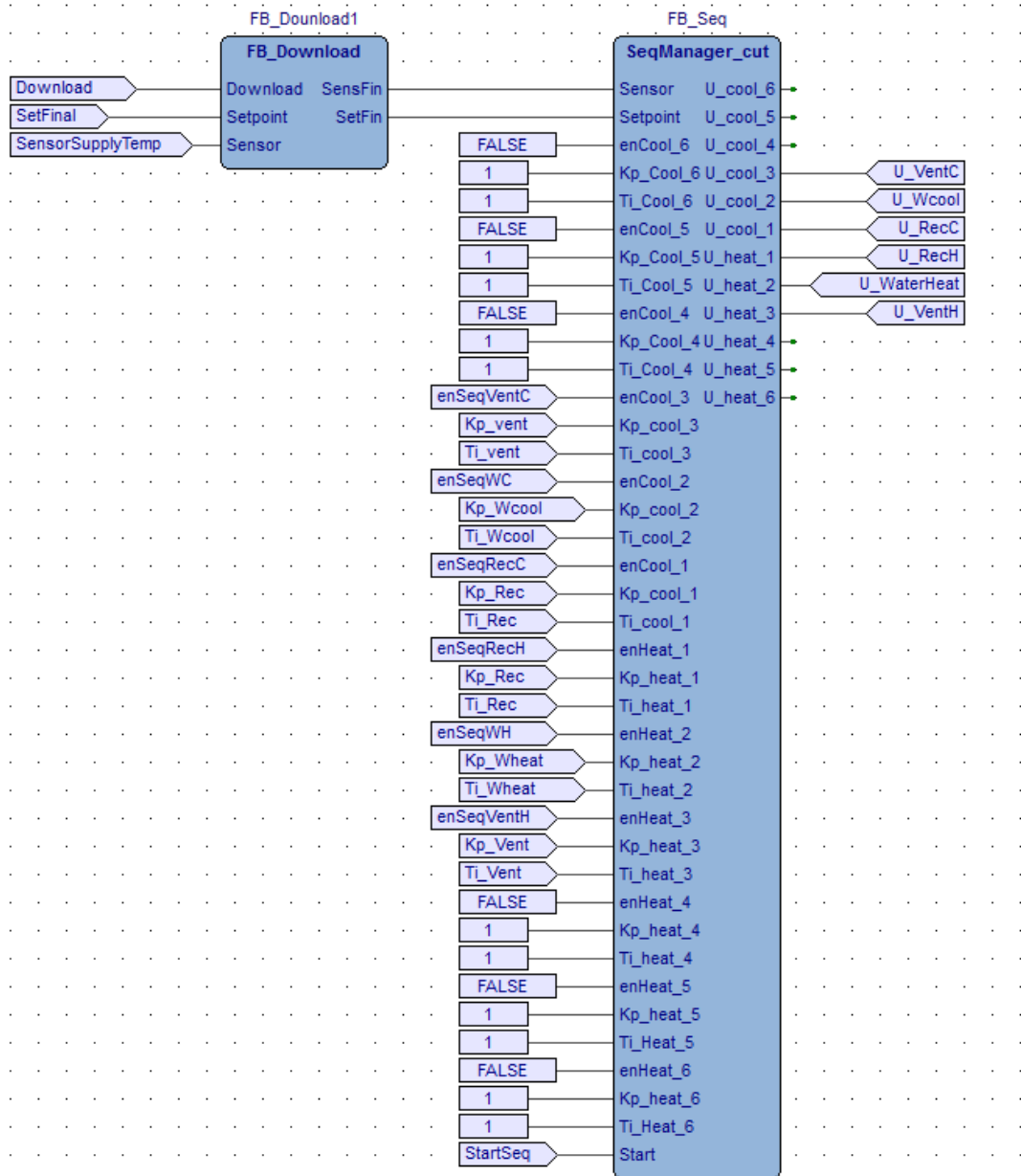


Рис. 4.7 Функціональний блок Seq

Блок Modes відповідає за режими роботи системи. Функціональний блок Season зображено на рис. 4.8: в залежності від температури зовнішнього повітря визначається пора року (літо, зима) з певним гістерезисом.



Рис. 4.8 Функціональний блок Season

Функціональний блок StartStop зображено на рис. 4.9: дозволяє обирати режим роботи установки (місцевий, таймер, дистанційний).

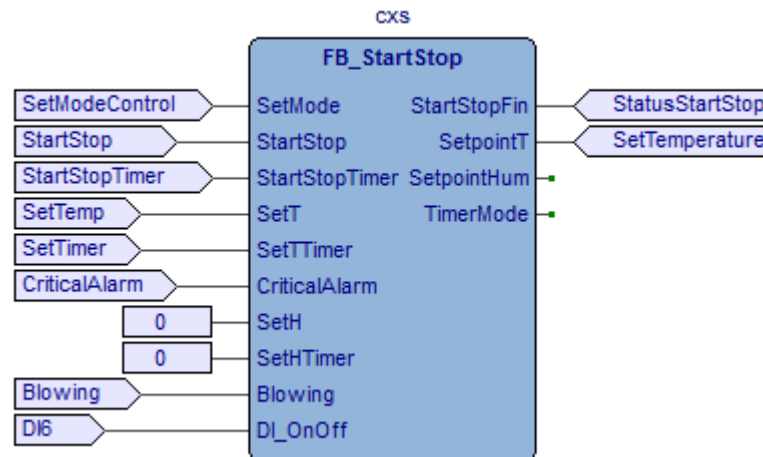


Рис. 4.9 Функціональний блок StartStop

Функціональний блок Comp зображено на рис. 4.10: при ввімкненій компенсації установка підтримує температуру повітря у приміщенні шляхом коригування уставки по датчику припливного каналу.

Керування нагріванням і охолодженням у вентиляційній установці здійснюється по датчику температури в каналі. Такий метод регулювання принципово не дозволяє повітря в приміщенні досягти температури уставки і не враховує особливості приміщення, наприклад, сторонні тепловиділення від радіаторів опалення або тепловтрати від відкритих квартир у вікнах. Для забезпечення регулювання температури повітря в приміщенні використовується каскадне регулювання, що називається «компенсація уставки».

Функція компенсації уставки повітря в каналі забезпечує:

- Обчислення поправки уставки температури повітря в припливно каналі в залежності від динаміки зміни температури повітря в приміщенні;
- Обмеження величини обчислюваної поправки, що не дозволяє подавати в приміщення занадто холодне або занадто тепле повітря.

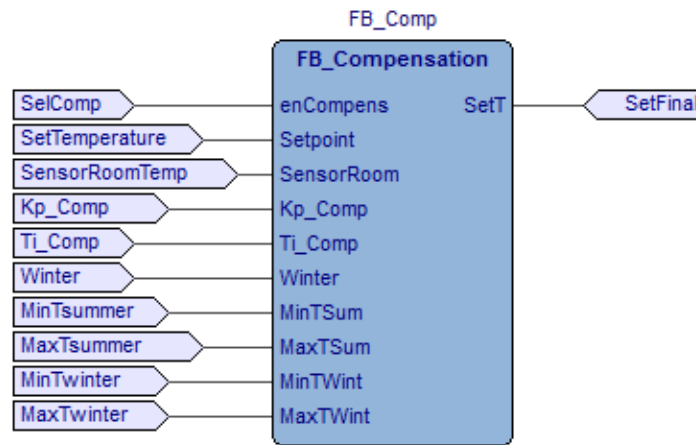


Рис. 4.10 Функціональний блок Comp

Блок Devices відповідає за всі пристрої, які використовуються в системі вентиляції. Сигнал для відкриття заслінок показано на рис. 4.11:

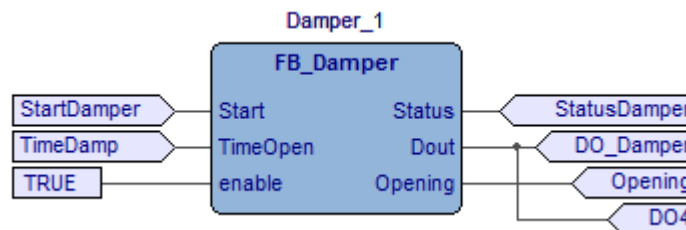


Рис. 4.11 Функціональний блок Damper

Функціональний блок Recirculation зображено на рис. 4.12. Рециркуляція знаходиться в протифазі з заслінками припливного і витяжного каналу. Камера змішування дозволяє підмішувати витяжної повітря до припливному в разі, якщо сумарної потужності нагрівальних приладів не вистачає для досягнення уставки. Для управління заслінкою реалізації реалізовані наступні функції:

- Плавне регулювання підмішування витяжного повітря;
- Обмеження максимального підмішування повітря.

Коли вентиляційна установка зупинена, заслінка рециркуляції повністю відкрита. При відкритті заслінки припливного повітря заслінка рециркуляції закривається. Мінімальний і максимальний кут відкриття заслінки рециркуляції визначається санітарно-гігієнічними нормами. Системи з рециркуляцією застосовуються тільки якщо повітря, що надходить з приміщення не містить шкідливих речовин та токсичних домішок.

Умови для роботи рециркуляції:

- Температура зовнішнього повітря нижче уставки, і температура в приміщенні вище температури зовнішнього повітря (нагрівання) або температура зовнішнього повітря вище уставки, і температура в приміщенні нижче температури зовнішнього повітря (охолодження);
- Різниця температур зовнішнього повітря і повітря в приміщенні більше 2 ° C.

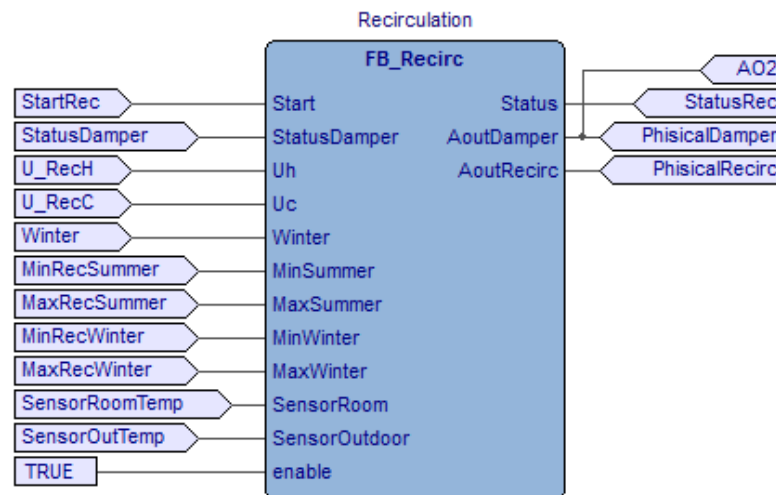


Рис. 4.12 Функціональний блок рециркуляції

Функціональний блок WaterHeater зображено на рис. 4.13: контролер має такі можливості для керування водяним калорифером:

- автоматичне підтримання заданої температури зворотної води в черговому режимі;
- автоматичне підтримання дозволеної тепломережею границі температури зворотної води;
- автоматичний контроль і запобігання небезпеки обмерзання калорифера шляхом аналізу температури зворотної води в каналі. Також контролюється сигнал капілярного термостату;
- можливість відключення контролю замерзання по температурі каналу в черговому режимі і в перший час після включення вентилятору ( функція продувки каналу);
- керування циркуляційним насосом.



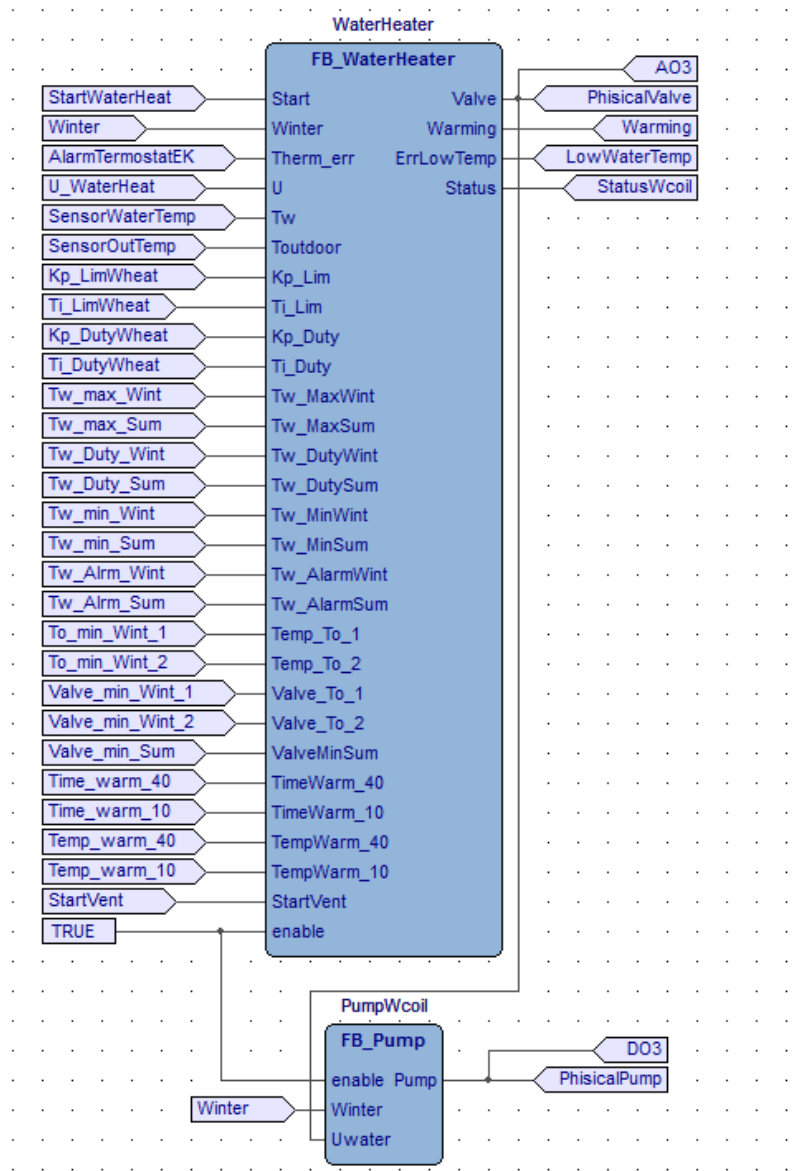


Рис. 4.13 Функціональний блок водяного калорифера

Функціональний блок WaterCool зображений на рис. 4.14. Водяний охолоджувач працює лише в режимі «літо».

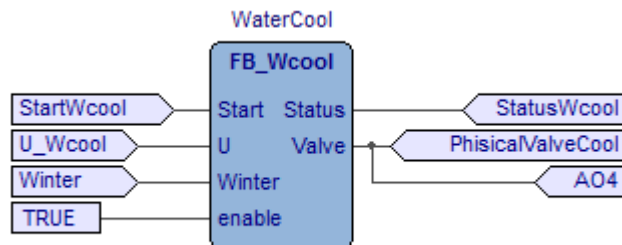


Рис. 4.14 Функціональний блок водяного охолоджувача

Блоки керування вентиляторами припливу та витяжки працюють аналогічно: якщо відсутні критичні аварії і є дозвіл на роботу (заслінки відкриті), то в залежності від значення регулятора вентилятори працюють через частотний перетворювач, що керується дискретним та аналоговими сигналами. В даній системі припливний та витяжний вентилятори мають окремі пуски.

Керування припливним вентилятором зображено рис. 4.15:

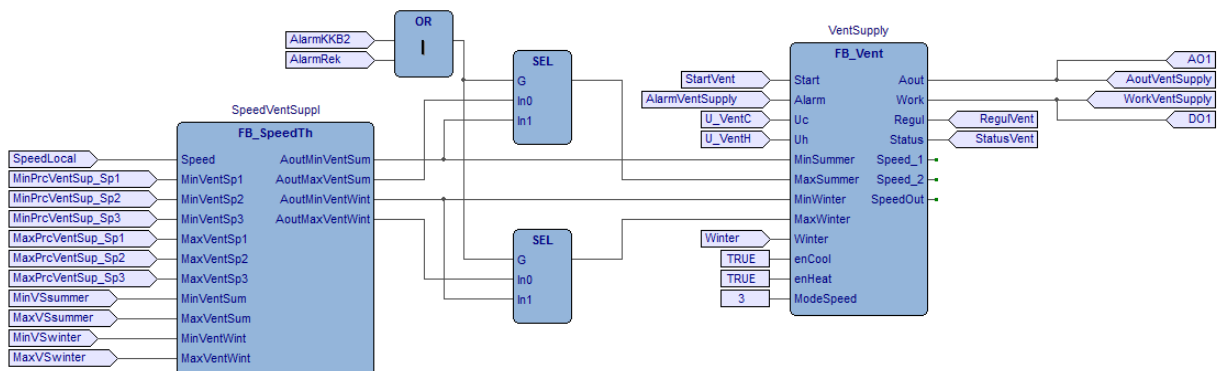


Рис. 4.15 Керування припливним вентилятором

Керування витяжним вентилятором зображено на рис. 4.16:

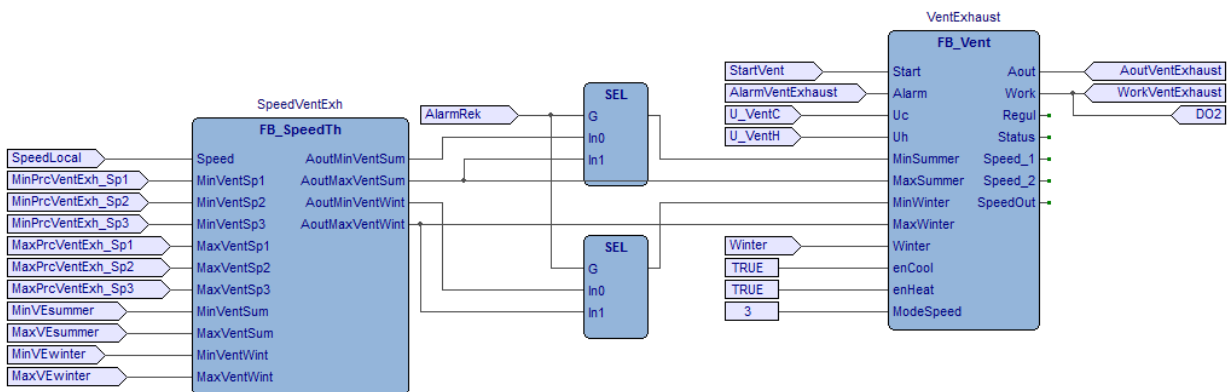


Рис. 4.16 Керування витяжним вентилятором

При переході з режиму «Викл» в режим «Робота», починається прогрів калорифера до температури зворотної води, визначеною графіком прогріву або статичною уставкою (режим «Прогрів»).

Зимою при запуску системи спочатку проходить прогрів водяного калорифера для уникнення руйнування теплообмінника. Після прогріву система запускається в звичайному режимі. Після прогріву і запуску починається регулювання температури повітря в припливному каналі по ПІ-закону регулювання. Логіка продемонстрована на рис. 4.17.

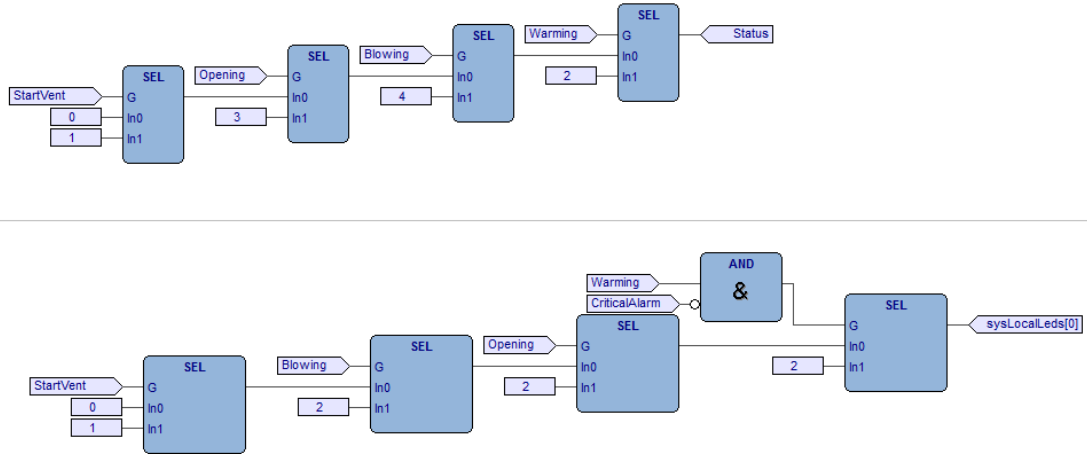


Рис. 4.17 Warming

Блок Schedule відповідає за роботу установки згідно з розкладом.

Налаштування дати і часу в контролері зображено на рис. 4.18:

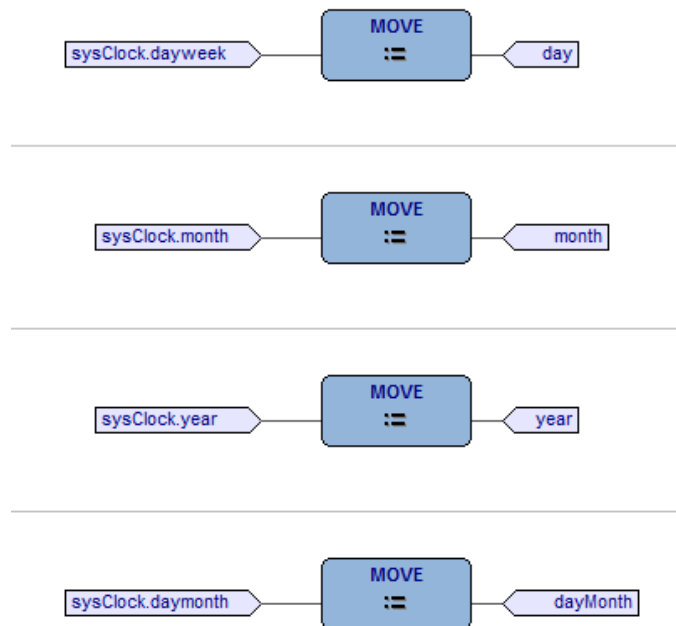


Рис. 4.18 Налаштування дати і часу

Налаштування для певного дня (понеділок – неділя) показано на рис. 4.18:

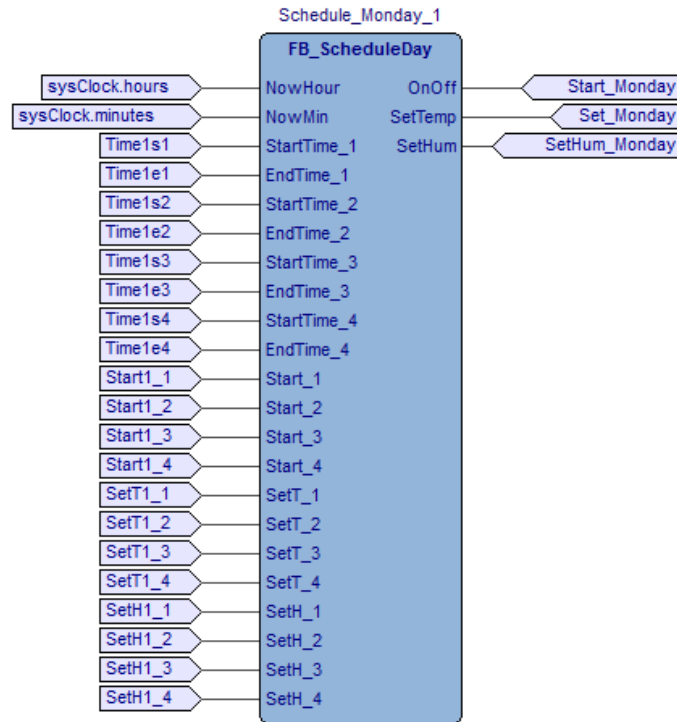


Рис. 4.18 Налаштування для дня тижня

Блоки, які вмикають установку по днях тижня зображені на рис. 4.19:

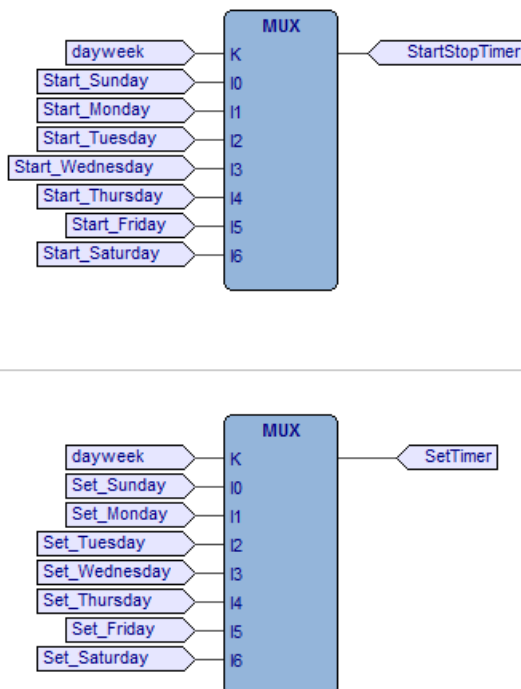


Рис. 4.19 Ввімкнення системи за розкладом

### 4.3 Диспетчеризація системи керування припливно-витяжною системою вентиляції

Для диспетчеризації системи керування ПВСВ була обрана SCADA-система фірми Shneider Electric. В якості програмного забезпечення для SCADA-системи було обрано Shneider Electric EcoStruxure™ Building Operation. Дана система реалізує обмін даними з контролером, відображає всі технологічні параметри та виконує реєстрацію спрацювання аварій.

Перед початком роботи система вимагає авторизації користувача. Допуститись до роботи може оператор, або адміністратор ввівши відповідний пароль, приклад зображено на рис. 4.21.

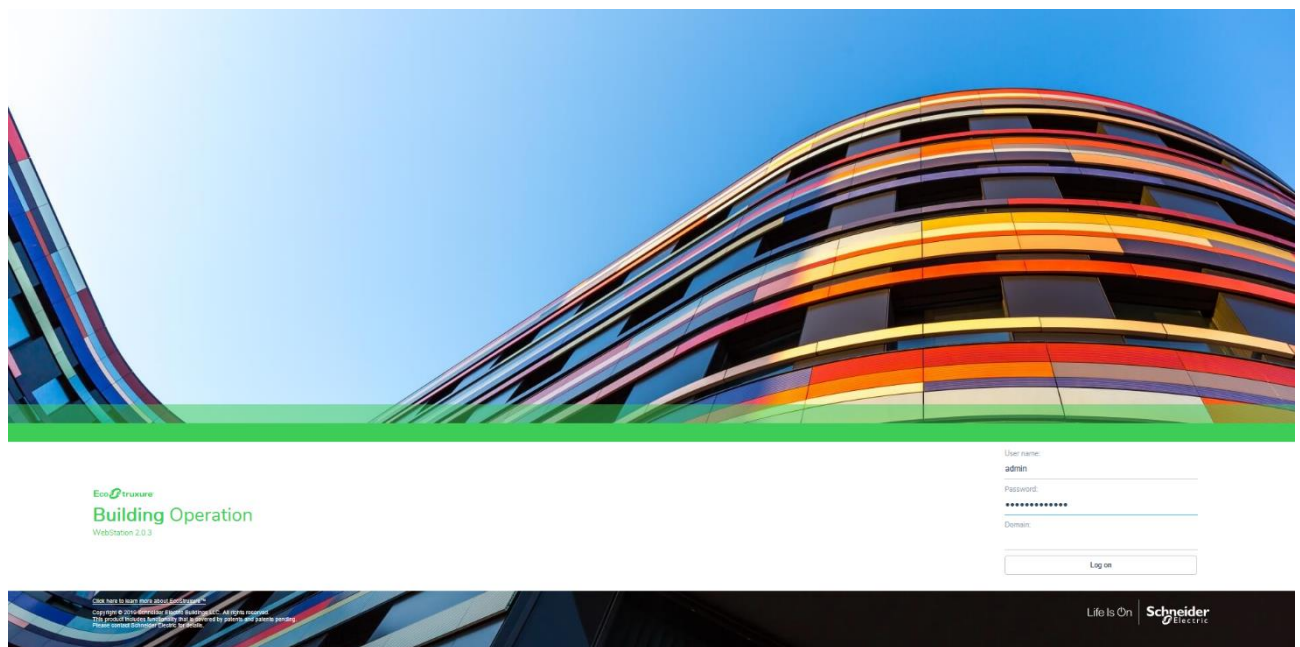


Рис.4.21 Вікно авторизації

Після успішної авторизації користувачу SCADA-системи відкривається головне вікно, де відображається мнемосхема об'єкту. На мнемосхемі схематично зображено функціональну схему системи вентиляції з рециркуляцією, а також візуально зображені датчики температури та реле перепаду тиску. Показання датчиків температури можна побачити на цифрових індикаторах. Також показано відсотки відкриття заслінок припливу, витяжки та рециркуляції, показано роботу насоса водяного калорифера, відсотки відкриття кранів водяного калорифера та водяного охолоджувача. Швидкість обертів вентиляторів припливу та витяжки показано у відсотках.

Розглянемо роботу SCADA-системи в режимах на нагрів та на охолодження. Система працює на нагрів в режимі «зима». На нагрів у системі працює водяний калорифер, насос водяного калореферу, вентилятори та заслінки. Приклад роботи показано на рис. 4.22.

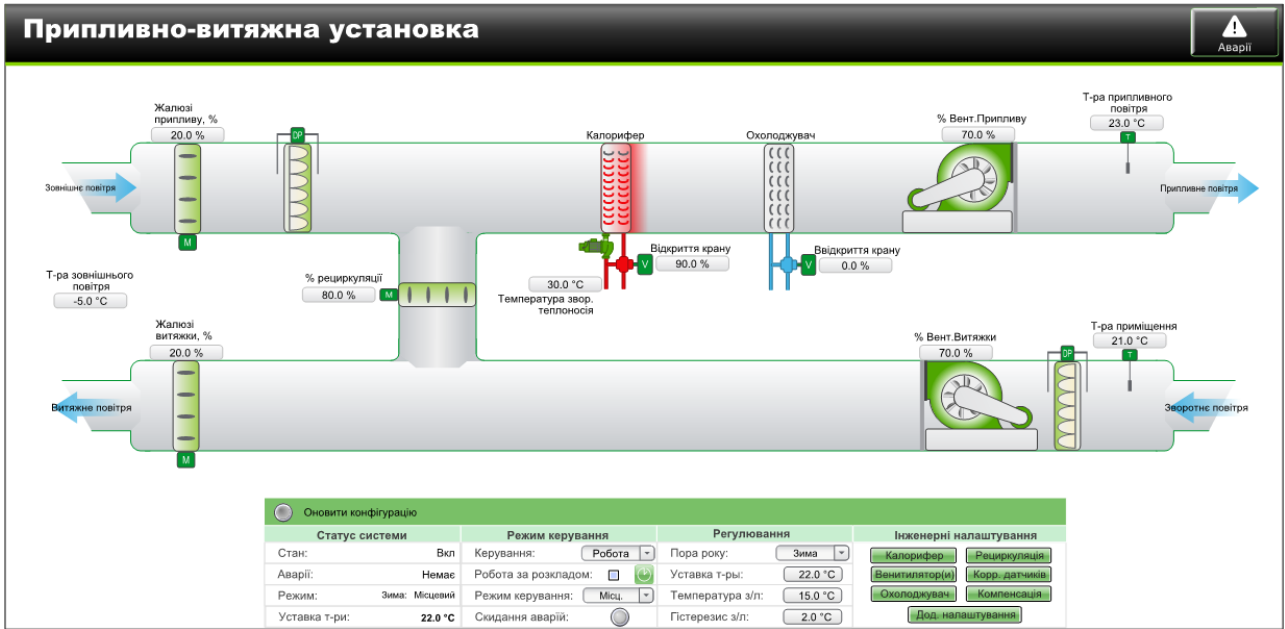


Рис. 4.22 Робота системи в режимі «зима»

Система працює на охолодження в режимі «літо». На охолодження у системі працює водяний охолоджувач, вентилятори та заслінки. Приклад роботи показано на рис. 4.23.



Рис. 4.23 Робота системи в режимі «літо»

Під мнемосхемою розташована панель керування установкою. Панель ділиться на чотири основні блоки: статус системи, режим керування, регулювання та інженерні налаштування. Блок статус системи показано на рис. 4.24. Блок відображає стан установки (включена, виключена, прогрів, жалюзі); аварії (немає, небезпечні, критичні), пора року (літо, зима); режим (місцевий, розклад); уставка температури в припливному каналі.

Статус системи	
Стан:	Вкл
Аварії:	Немає
Режим:	Зима: Місцевий
Уставка т-ри:	22.0 °C

Рис. 4.24 Блок статус системи

Блок режим керування показано на рис. 4.25. В даному блоці можна керувати установкою, а саме: вмикати/виключати установку, вмикати роботу за розкладом, вибирати режим керування та скидати аварії.



Режим керування	
Керування:	Робота ▾
Робота за розкладом:	<input type="checkbox"/> 
Режим керування:	Місц ▾
Скидання аварій:	

Рис. 4.25 Блок режим керування

Блок регулювання показано на рис. 4.26. В даному блоці можна обирати пору року, задавати уставку температури припливного повітря та задавати температуру переходу між літом та зимою в автоматичному режимі, та гістерезис переходу між зимою та літом.

Регулювання	
Пора року:	Зима
Уставка т-ры:	22.0 °C
Температура з/л:	15.0 °C
Гістерезис з/л:	2.0 °C

Рис. 4.26 Блок регулювання

Блок інженерні налаштування показано на рис. 4.27. Блок включає в себе налаштування водяного калорифера, водяного охолоджувача, вентиляторів, рециркуляції, компенсацію уставки, додаткові налаштування та корекцію датчиків.

Інженерні налаштування	
Калорифер	Рециркуляція
Вентилятор(и)	Корр. датчиків
Охолоджувач	Компенсація
Дод. налаштування	

Рис. 4.27 Блок інженерні налаштування

Тренди реального часу відображають зміни встановлених параметрів. Даний тренд фіксує зміну температури припливного повітря за останніх 12 годин. Вікно трендів зображено на рис. 4.28.

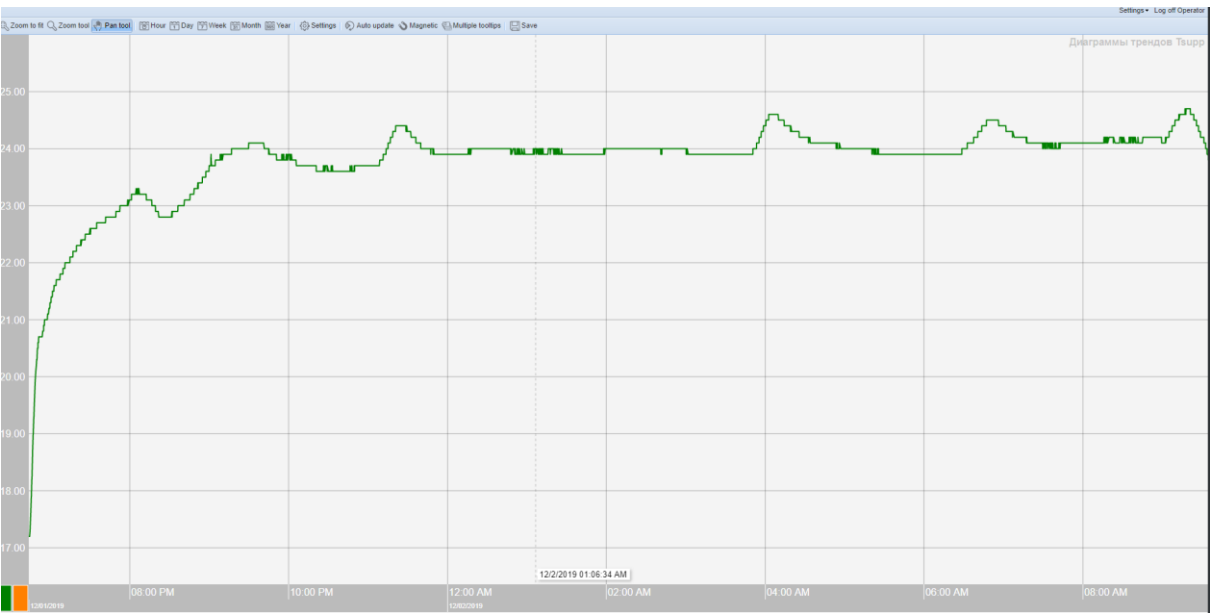


Рис. 4.28 Вікно трендів реального часу



Система буде повідомляти про виявлення небезпечних та критичних аварій. Зімітуємо аварію фільтрів припливу та витяжки. На мнемосхемі, що зображено на рис. 4.29 фільтри змінили забарвлення на червоне. У блоці статус системи відображається, що є небезпечна аварія, також з'явився дзвіночок на кнопці аварії.

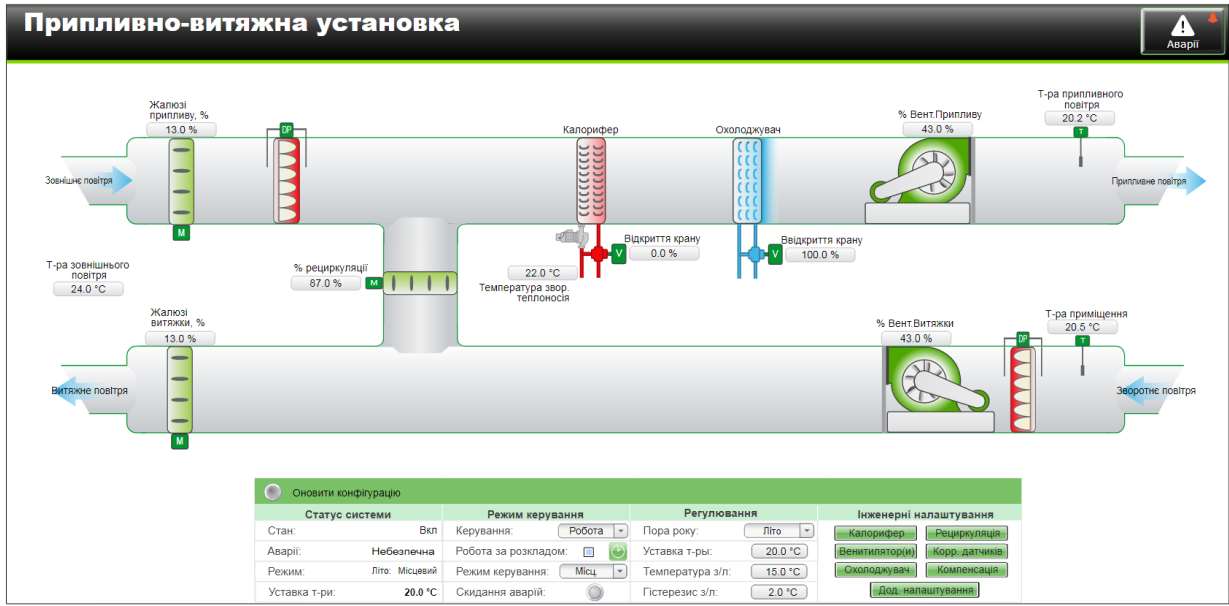


Рис. 4.29 Аварія фільтрів

Зімітувавши аварію припливного вентилятору відбудеться повна зупинка системи вентиляції. На мнемосхемі, що зображено на рис. 4.30 навколо вентилятору з'явиться червона лінія. В блоці статус системи буде відображатись критична аварія і з'явився дзвіночок на кнопці аварії.

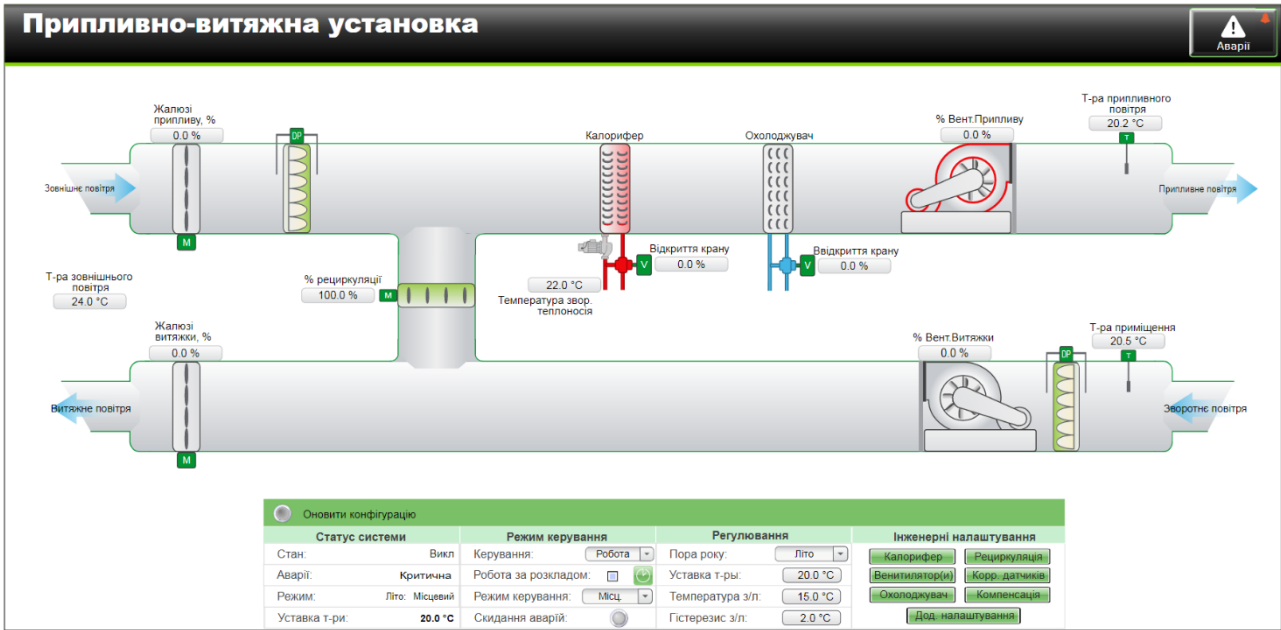


Рис. 4.30 Аварія припливного вентилятору

У вікні аварій оператор може переглядати як поточні, так й історичні аварії та підтверджувати їх. Зовнішній вигляд даного вікна наведено на рис. 4.31.

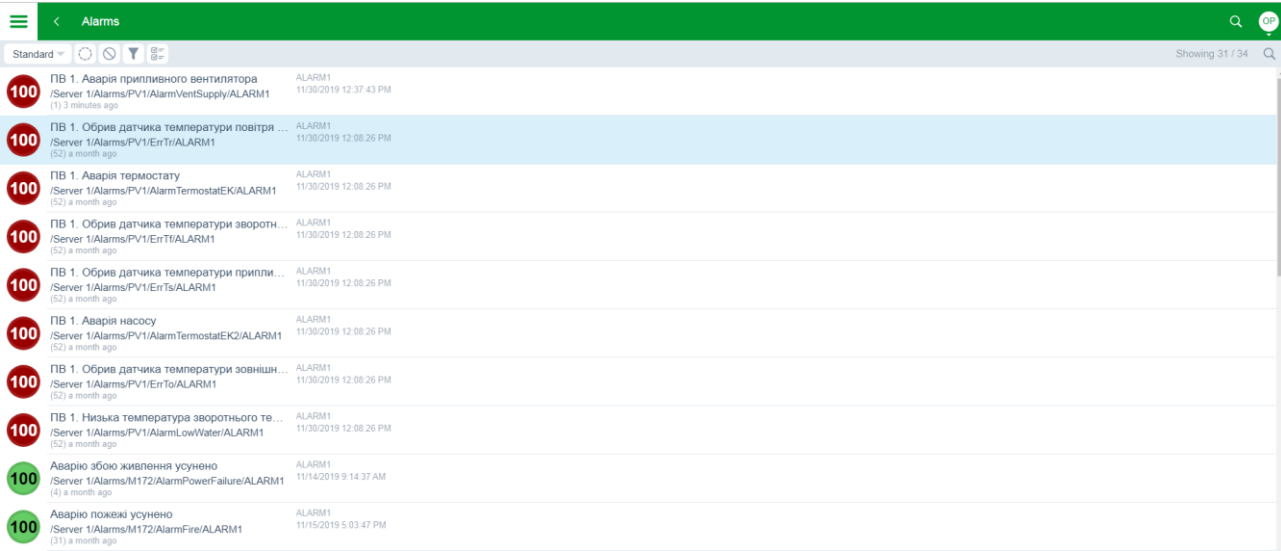


Рис. 4.31 Вікно аварій

## 5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Розробку стартап-проекту виконано орієнтуючись на рекомендації [11].

### 5.1 Опис ідеї проекту

Зміст ідеї, що пропонується, можливі напрямки її застосування та основні вигоди, що може отримати користувач за кожним напрямком застосування наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розроблення адаптивної системи автоматичного керування припливно-витяжною системою вентиляції з рециркуляцією	Створення системи автоматизації з нуля / повна заміна уже існуючої системи автоматизації	Отримання системи автоматизації з сучасним обладнанням
	Часткове оновлення системи автоматизації, що включає як засоби автоматизації, так і систему диспетчеризації	Заміна застарілих засобів автоматизації на сучасні, розроблення систему диспетчеризації
	Часткове оновлення системи автоматизації, що включає лише систему диспетчеризації	Розроблений система диспетчеризації для віддаленого керування установкою

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	Товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проект	Маестро клімат	Здоров клімат			
Віддалене керування установкою	Наявне	Відсутнє	Відсутнє			+
Надійність обладнання	Обладнання з високим ступенем надійності	Обладнання з середнім ступенем надійності	Обладнання з середнім ступенем надійності			+
Ціна	Ціна вище середньої	Середня ціна	Ціна нижче середньої	-		

## 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту наведено у таблиці 5.3. Відповідно до проведеного аналізу можна зробити висновок, що ідея проекту є технологічно здійсненною.

Таблиця 5.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Автоматичне керування системою вентиляції	Програмовані логічні контролери, датчики температури, тиску, витрати	Технологія наявна	Технологія знаходиться у широкому доступі
Диспетчеризація роботи системи вентиляції	SCADA-система	Технологія наявна	Технологія знаходиться у широкому доступі
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: для реалізації автоматичного керування застосовуватимуться програмовані логічні контролери та датчики; для реалізації диспетчеризації використовуватиметься SCADA-система.			

## 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть пере-шкодити реалізації проекту, наведено у таблиці 5.4.

Враховуючи те, що кількість головних гравців невелика, динаміка ринку зростає та середня рентабельність в галузі перевищує банківський відсоток на вкладення, можна зробити висновок, що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Таблиця 5.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Показники стану ринку	Характеристика
Кількість головних гравців, од	4
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
Наявність обмежень для входу	Відсутні
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	48%

Визначення потенційних груп клієнтів та формування вимог до проекту наведені у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Наявність диспетчеризації системи	Підприємства, які потребують якісну систему вентиляції	Різні вимоги до надійності, вартості	Повинна бути доступна інформація про поточний стан системи вентиляції та можливість віддаленого ручного керування

Фактори, що перешкоджають ринковому впровадженню проекту, та фактори, що сприяють йому, наведені у таблиці 5.6 та 5.7 відповідно. Фактори в таблиці подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 5.6 Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Нерозуміння клієнтів важливості віддаленого керування	Клієнти можуть не розуміти важливості впровадження віддаленого керування для систем автоматичного керування	Доносити важливість до клієнтів
Висока ціна	Клієнти можуть не мати коштів на впровадження системи	Шукати шляхи зменшення ціни

Таблиця 5.7 Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Надійність системи	Система автоматичного керування створена з використанням засобів контролю, керування та безпеки з високим ступенем надійності	Пропонувати впровадження даного проекту з високими вимогами до надійності

Проведемо аналіз пропозиції та визначимо загальні риси конкуренції на ринку. Результати наведені у таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії)
--------------------------------------	---	--

		компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції – чиста конкуренція	Немає високого порогу для входу	Участь в тендерах, презентація продукту на тематичних виставках
Рівень конкурентної боротьби – національний	Розгортання проекту потребує фізичної присутності більшої частини команди, що ускладнюється при роботі з іноземними клієнтами	Просування товару по всій країні
Конкуренція за галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Проекти з інших галузей не підходять для задоволення вимог клієнтів	Розповідати про свої переваги перед конкурентом у даній галузі
Конкуренція за видами товарів – товаро-видова	Конкуренція з проектами, що пропонують автоматичне керування	Використовувати надійне обладнання, яке зарекомендує себе в довгостроковій перспективі
Конкуренція за видами конкурентних переваг – цінова	Конкуренція залежить від ціни	Оптимізація собівартості товару, що дає суттєвий вигравш у ціні у великих об'ємах закупівель
Конкуренція за інтенсивністю - марочна	Пропонуються схожі функції	Надання функцій, які не надають конкуренти, оптимізація функцій, що мають конкуренти

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера. Результати представлені у таблиці 5.9.

Відповідно до результатів аналізу можна сказати, що з огляду на конкурентну ситуацію у даного проекту є всі шанси для роботи на ринку. Щоб

бути конкурентоспроможним, проект потрібно презентувати на тендерах та виставках, намагатись оптимізувати собівартість товару та впроваджувати нові функції, що відсутні у конкурентів.

На основі аналізу конкуренції, наведеного в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Маестро клімат, Здоров клімат	Низький поріг для входження в галузь	Встановлення ціни, кількості товару	Контроль якості	Відсутні
Висновки	Середня інтенсивність конкурентів	Немає серйозних перепон для входу на ринок, немає інформації про потенційних конкурентів	Постачальники диктують ціну та кількість товару	Клієнти диктують вимоги згідно умов експлуатації	Обмеження для роботи на ринку через товари-замінники відсутні

Також із урахуванням характеристик ідеї проекту, наведених у таблиці 5.2, вимог споживачів до товару, що зазначені у таблиці 5.5 та факторів маркетингового середовища, представлених у таблиці 5.6 та таблиці 5.7, визначимо перелік факторів конкурентоспроможності. Даний перелік представлено у таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності



Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
Віддалене керування системою вентиляції	У конкурентів відсутня систематична та цілісна система віддаленого керування
Надійне обладнання	У даному проекті використовується обладнання з високим ступенем надійності, що є перевагою у порівнянні з конкурентами

За визначеними факторами конкурентоспроможності, що наведені у таблиці 5.10, проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту. Результати аналізу наведені у таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з даним стартапом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Система віддаленого керування	20	+						
2	Надійне обладнання	19		+					
3	Ціна	16					+		

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін, що наведені у таблиці 5.11.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів

потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза). Результати даного аналізу наведені у таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 SWOT - аналіз стартап-проекту

<b>Сильні сторони:</b> Система віддаленого керування Надійне обладнання	<b>Слабкі сторони:</b> Ціна
<b>Можливості:</b> Зростання ринку Поступове розуміння необхідності систем віддаленого керування	<b>Загрози:</b> Створення конкурентами схожих проектів

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Дані альтернативи наведені у таблиці 5.13.

Таблиця 5.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Терміни реалізації
1	Орієнтація даного проекту на ринок державних підприємств великих міст	65%	4 міс.
2	Орієнтація даного проекту та ринок приватних підприємств великих міст	75%	3 міс.
3	Орієнтація даного проекту на ринок державних підприємств середніх та малих міст	55%	4 міс.

4	Орієнтація даного проекту та ринок приватних підприємств середніх та малих міст	50%	3 міс.
---	---	-----	--------

Відповідно до наведених вище альтернатив, цільовою орієнтацією для даного проекту обираємо орієнтацію на приватні підприємства великих міст, оскільки у даному випадку ймовірність отримання ресурсів є вищою, а терміни реалізації є більш стислими у порівнянні з іншими альтернативами.

#### 5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Першим кроком у розробленні ринкової стратегії проведемо визначення стратегії охоплення ринку та опишемо цільові групи потенційних споживачів. Отримані результати наведено у таблиці 5.14.

Таблиця 5.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в мережах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
Власники великої мережі підприємств	Потребують недовгих переговорів	Вище середнього	Нижче середньої	Нескладно
Власники локального підприємства	Потребують переговорів	Середній	Низька	Нескладно
Які цільові групи обрано: Власники великих та локальних підприємств				

Відповідно до обраних цільових груп, у якості стратегії охоплення ринку обирається стратегія диференційованого маркетингу, оскільки проводитиметься робота з кількома сегментами і при цьому для кожного сегменту розроблятиметься окрема програма ринкового впливу.

Для роботи в обраних сегментах ринку сформуємо базову стратегію розвитку та занесемо результати до таблиці 5.15.

Далі виберемо стратегію конкурентної поведінки та занесемо результати до таблиці 5.16.

Таблиця 5.15 Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Орієнтація даного проекту та ринок приватних підприємств великих міст	Стратегія диференційованого маркетингу	Приватні підприємства великих міст мають більшу потребу у віддаленому керуванні та високі вимоги до надійності	Стратегія диференціації

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. таблицю 5.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (таблиця 5.15) та стратегії конкурентної поведінки (таблиця 5.16) розробимо стратегію позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект. Результати наведені у таблиці 5.17.

Таблиця 5.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Компанія буде шукати нових споживачів	Якщо у конкурентів з'являться «проривні» характеристики, то	Стратегія заняття конкурентної ніші

		компанія намагатиметься їх копіювати	
--	--	---	--

Таблиця 5.17 Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
Ні	Компанія буде шукати нових споживачів	Якщо у конкурентів з'являться «проривні» характеристики, то компанія намагатиметься їх копіювати	Стратегія заняття конкурентної ніші

### 5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Спочатку сформуємо маркетингову концепцію товару, який отримає споживач. Підсумки попереднього аналізу конкурентоспроможності товару наведені у таблиці 5.18.

Таблиця 5.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Віддалене керування системою вентиляції	Система віддаленого керування системою вентиляції	Відсутність такого функціоналу у конкурентів
2	Надійність обладнання	У системі використовується обладнання з високим ступенем надійності	Обладнання має вищу надійність у порівнянні з конкурентами

Наступним кроком є визначимо цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни

відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту). Аналіз проведемо експертним методом та занесемо результати до таблиці 5.19.

Таблиця 5.19 Визначення меж встановлення ціни

Рівень ціни на товари-замінники	Рівень-цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межа встановлення ціни на товар
20000-60000 грн.	30000-80000 грн.	4000-30000 грн.	100000-300000 грн

Далі проведемо визначення оптимальної системи збуту. Результати наведені у таблиці 5.20.

Таблиця 5.20 Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Закупівля через тендери	Дотримання термінів та норм встановлення системи	Живе спілкування	Проводити збут власноруч через тендери

Останнім кроком розробимо концепцію маркетингових комунікацій, що спиратиметься на попередньо обрану основу для позиціонування та визначену специфіку поведінки клієнтів. Результати наведені у таблиці 5.21.

Таблиця 5.21 Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Влаштування тендеру для отримання оптимального продукту	Телефон, електронна пошта, веб-сайти	Система автоматичного керування та віддаленого керування	Донести до клієнта важливість віддаленого керування	Демонстрація можливостей

		системою вентиляції	для його системи	
--	--	------------------------	---------------------	--

Отже, у даному розділі було проведено технологічний аудит ідеї проекту під час якого було визначено, що система є технологічно здійсненною, проведено аналіз ринкових можливостей, який показав, що проект має переваги над існуючими проектами та є конкурентоздатним.

Було розроблено ринкову стратегію проекту, у якій цільовою аудиторією є власники великих та локальних підприємств великих містах України. Для охоплення ринку використовуватиметься стратегія диференційованого маркетингу, а у якості базової стратегії розвитку було обрано стратегію диференціації. Конкурентна боротьба проводитиметься за стратегією зайняття конкурентної ніші.

Було розроблено маркетингову програму, де визначено ключові переваги над конкурентами, можливий діапазон встановлення цін на проект, обрано систему збуту через тендер як оптимальну систему збуту. У якості основного завдання реклами було обрано донесення до клієнта важливості якісної автоматизації системи вентиляції та можливості віддаленого керування системою.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської роботи було розроблено адаптивну систему автоматичного керування припливно-витяжної системи вентиляції з рециркуляцією. У ході виконання роботи було досліджено основні рішення з автоматизації систем вентиляції. Було розроблено математичні моделі водяного калориферу, водяного охолоджувачу та приміщення, що дало змогу створити математичну модель припливно-витяжної системи з рециркуляцією.

Розроблено адаптивну систему керування системою вентиляції в залежності від положення заслінки рециркуляції. Було обрано ті налаштування, що забезпечують необхідну якість регулювання для досягнення необхідних температурних параметрів у приміщенні, а також забезпечують необхідні показники ефективності обладнання. Оптимальні налаштування було визначено за інтегральними показниками якості із мінімізацією керуючого впливу, а саме модульним критерієм якості.

Розроблено програмне забезпечення для нижнього та верхнього рівня системи автоматизації. Для реалізації автоматизовано керування системою вентиляції було обрано контролер Schneider Electric Modicon M172. Даний контролер призначений для автоматизації систем вентиляції та кондиціонування повітря. Програмне забезпечення було розроблене за допомогою середовища програмування Schneider Electric EcoStruxure™ Machine Expert – HVAC. Програмне забезпечення для контролера реалізує функції автоматичного регулювання, блокування та захисту. При програмуванні було розроблено наступні функціональні блоки: блок обробки аварій; блок обробки показань датчиків; блок керування регуляторами; блок режимів роботи установки; блок керування установкою за розкладом та блоки пристроїв (повітряні заслінки, рециркуляція, водяний нагрівач, водяний охолоджувач та вентилятори).

Для реалізації верхнього рівня системи автоматизації було обрано SCADA-систему, що пропонує Schneider Electric. Дана система реалізує обмін даними з контролером, відображає всі технологічні параметри та виконує реєстрацію спрацювання аварій. В якості програмного забезпечення для SCADA-системи



використовується Shneider Electric EcoStruxure™ Building Operation. Програмне забезпечення для верхнього рівня включає в себе програмне забезпечення для SCADA-системи, що реалізує функції централізованого віддаленого моніторингу, ручного керування, зміни налаштувань регуляторів, перегляду аварій та трендів. Завдяки даному програмному забезпеченню можливе автоматичне керування системою вентиляції, її моніторинг та обслуговування.

Також було розроблено стартап-проект адаптивної системи вентиляції з рециркуляцією. Описано ідею проекту, проведено технологічний аудит ідеї проекту, проаналізовано ринкові можливості запуску проекту, розроблено ринкову стратегію та маркетингову програму. Було встановлено, що даний проект є технологічно здійсненним, має переваги над конкурентами та є конкурентоздатним. Для охоплення ринку використовуватиметься стратегія диференційованого маркетингу, а у якості базової стратегії розвитку було обрано стратегію диференціації. Конкурентна боротьба проводитиметься за стратегією зайняття конкурентної ніші.

Матеріали даної роботи використані у публікаціях [1, 2].

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Адах В.Г., Голінко І.М. Аналіз системи керування для припливно-витяжної вентиляції із рециркуляцією: тези Дванадцятої Міжнародної науково-практичної конференції Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2019), м. Київ, 21-22 травня 2019р. Київ: НАУ, 2019. – С. 168–170.
2. Адах В.Г., Голінко І.М. Математична модель припливно-витяжної системи вентиляції із рециркуляцією: тези XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів, м. Київ, 23-26 квітня 2019 р. У 2 т. Київ: НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського", 2019. – Т. 2 – С. 14.
3. Бондарь Е.С., Гордиенко А.С. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Київ: ТОВ «Видавничий будинок «Аванпост-Прим», 2005. 560 с.
4. Голінко І. М., Галицька І.Є. Динамічна модель теплообміну для водяного калорифера у просторі станів // Інформаційні системи, механіка та керування. Київ – 2016. № 15, – С. 83–92.
5. Голінко І.М. Моделювання та оптимізація систем керування: монографія. Кам'янець-Подільський : ПП Буйницький, 2012. 262 с.
6. Голінко І.М. Синтез оптимальних систем керування із мінімізацією керуючого впливу // Радіoeлектронні і комп'ютерні системи. Київ, 2012. № 2(54). С. 79–88.
7. Голінко І.М., Галицька І.Є. Промислове приміщення як динамічний елемент системи керування штучним мікрокліматом // Інформаційні системи, механіка та керування. Київ – 2018. № 18, С. 30–38.
8. Каталог. Системы кондиционирования воздуха – «ВЕЗА». Москва: ООО «ВЕЗА», 2014. – 105 с.
9. Остапенко Ю.О., Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування. Київ: Задруга, 1999. 424 с

- 10.Пеклов А.А., Кондиционирование воздуха в промышленных и общественных зданиях. Київ: Видавництво Будівельник, 1967. 295с.
- 11.Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей за заг. ред. О.А. Гавриша. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.
- 12.Свистунов В.М., Пушняков Н.К., Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и коммунального хозяйства. Санкт-Петербург: Политехника, 2007. 423 с.
- 13.Стефанов Е.В., Инженерные системы зданий. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Санкт-Петербург: АВОК Северо-Запад, 2005. 399 с.
- 14.Строй А.Ф., Колодяжний В.В., Расчет и проектирование систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Москва: Стройиздат, 2011. 343 с.